

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Vliv technologických a tvářecích parametrů na proces vícenásobné
plastické deformace

Influence of Technological and Forming Parameters on Severe Plastic
Deformation Process

Student:

Bc. Pavel Szkandera

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Stanislav Rusz, CSc.

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Szkandera**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**

Téma: **Vliv technologických a tvářecích parametrů na proces vícenásobné
plastické deformace**
**Influence of Technological and Forming Parameters on Severe Plastic
Deformation Process**

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši současného stavu nejčastěji používaných metod tváření využívající princip vícenásobné plastické deformace.
- 2) Experimentálně ověřte proslachování pásu plechu z oceli DC01 metodou DRECE (Dual Rolls Equal Channel Extrusion) s úhlem nástroje 108°.
- 3) Analyzujte dosažené mechanické vlastnosti a tvrdost po jednotlivých průchodech tvářecím zařízením a výsledky porovnejte s výchozím stavem.
- 4) Proveďte metalografickou analýzu vzorků u vybraných průchodů.
- 5) Proveďte výsledné srovnání vlivu počtu průchodů na dosažené mechanické vlastnosti.
- 6) Proveďte celkové srovnání dosažených výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Valiev, R., Z., Zhilyaev, A., P. and Langdon, T. G. Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications, [Warrendale]: TMS; Hoboken: Wiley, c2014
- [2] Gutkin, M. Yu., Ovidko, I.A. and Pande, C.S. Theoretical models of plastic deformation processes in nanocrystalline materials, *Reviews on Advanced Materials Science*, September 2001, Vol. 2, p. 80 - 102
- [3] Valiev, R. Recent developments of severe plastic deformations techniques for processing bulk nanostructured materials, *Materials Science Forum A*, 579, (2008) p. 1 - 14
- [4] Lee, J. C., Seok, H. K., HaJ., H., and Chung, J. Y. Controlling the textures of the metal strips via the continuous confined strip shearing (C2S2) process, *Mater. Res. Bull.*, 2001; Vol. 36, p. 997 - 1004
- [5] Lee, J. C., Seok, H. K. and Suh, J. Y. Microstructural evolutions of the Al strip prepared by cold rolling and continuous equal channel angular pressing, *Acta Mater.* 2002, Vol. 50, p. 4005 - 4019
- [6] Cheng, Y. Q., Chen, Z. H. and Xia, W. J. Drawability of AZ31 magnesium alloy sheet produced by equal channel angular rolling at room temperature, *Mater. Charact.*, 2007, Vol. 58, p. 617 - 622

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

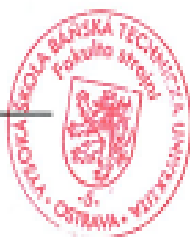
Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Stanislav Ruzs, CSc.

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018



Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry






doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

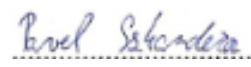
V Ostravě 14. 5. 2018


podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uloženu vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 14. 5. 2018


podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Pavel Szkandera

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Horní Lomná 54,
739 91 Jablunkov

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SZKANDERA, P. *Vliv technologických a tvářecích parametrů na proces vícenásobné plastické deformace: diplomová práce*. Ostrava VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2018, 73 s. Vedoucí práce: Rusz, S.

Diplomová práce je zaměřena na proces vícenásobné plastické deformace (SPD). V práci jsou popsány nové tvářecí metody využívající princip SPD. V praktické části práce byly provedeny experimenty na oceli DC01 metodou DRECE. Cílem experimentů bylo ověření vlivu počtu průchodů tvářecím zařízením na dosažené mechanické vlastnosti u dané oceli. Mechanické vlastnosti byly zjišťovány tahovými zkouškami. Dále byl stanoven vliv anizotropie materiálu na mechanické vlastnosti, změřena tvrdost a mikrotvrdost a provedena analýza mikrostruktury tvářené oceli ve výchozím stavu a po průchodech tvářecím zařízením. V závěrečné části diplomové práce je provedeno celkové vyhodnocení dosažených výsledků

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

SZKANDERA, P. *Influence of Technological and Forming Parameters on Severe Plastic Deformation Process: Diploma Thesis*. Ostrava : VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical technology, 2018, 73 p. Thesis head: Rusz, S.

The diploma thesis is focused on the process severe plastic deformation (SPD). New methods using the SPD principle are described in the thesis. In the practical part of the work, experiments were carried out on DC01 steel using the DRECE method. The aim of the experiments was to verify the influence of the number of passes by the forming device on the achieved mechanical properties of the steel, using tensile tests. The influence of anisotropy of tested material on mechanical properties was determined. In next part of work toughness and micro hardness were measured and the microstructure of the forming steel was also performed. In the final part of the thesis are made an overall summary of achieved results.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 VÍCENÁSOBNÁ PLASTICKÁ DEFORMACE	12
1.1 Ultra jemnozrnné materiály	12
2 METODY SPD POUŽÍVANÉ PRO TVORBU UFG MATERIÁLŮ	14
2.1 Cyclic Severe plastic deformation	14
2.2 Multidirectional forging and unidirectional bar rolling	15
2.3 Constrained groove pressing (CGP)	17
2.4 Dissimilar Channel Angular Pressing (DCAP)	18
2.5 Daul rolls equal channel extrusion (DRECE)	19
2.6 Accumulative roll bonding (ARB)	20
2.7 Repetitive corrugation and straightening (RCS)	22
2.8 Equal-channel angular pressing (ECAP)	23
3 EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE	26
3.1 Plán experimentů	26
3.2 Charakteristika tvářené oceli	26
3.3 Experiment metodou DRECE	27
4 ANALÝZA VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU	30
4.1 Mechanické vlastnosti	30
4.2 Vliv anizotropie materiálu a počtu průchodů na mechanické vlastnosti	34
4.3 Tvrdost	42
4.4 Mikrotvrost	46
5 ANALÝZA MIKROSTRUKTURY	50
5.1 Analýza mikrostruktury	51
5.2 Stanovení velikosti zrn	54

6	CELKOVÉ ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU	56
6.1	Zhodnocení mechanických vlastností.....	56
6.2	Zhodnocení vlivu anizotropie materiálu a počtu průchodů na mechanické vlastnosti.....	58
6.3	Zhodnocení mikrostruktury	60
6.4	Zhodnocení vlivu metody DRECE na velikost zrn	61
6.5	Porovnání výsledků tahových zkoušek	61
	ZÁVĚR	66
	PODĚKOVÁNÍ	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITRATURY	69

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

Značka	Název	Jednotka
A_{80}	tažnost na měřené délce 80 mm	[%]
HV10	tvrdost dle Vickerse	[HV10]
HV0,1	tvrdost dle Vickerse	[HV0,1]
F	zatěžující síla	[N]
$F_{p0,2}$	zatížení na smluvní mezi kluzu	[N]
F_m	zatížení na mezi pevnosti	[N]
R_m	mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
Φ	úhel mezi dvěma kanály	[°]
ψ	vnější úhel zakřivení kanálů	[°]

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ARB	Accumulative- Roll- Bonding
CGP	Constrained groove pressing
CPIT	Centrum podpory inovativních technologií
DCAP	Dissimilar channel angular pressing
DRECE	Dual rolls equal channel extrusion
ECAP	Equal channel angular pressing
GDOES	Glow- discharge optical emission spectroscopy
RCS	Repetitive corrugation and straightening
SEM	Řádkovací elektronový mikroskop
SPD	Severe Plastic Deformation (vícenásobná (intenzivní) plastická deformace)
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
UFG	Ultrafine- grained
VS	Výchozí stav materiálu
VŠB- TUO	Vysoká škola báňská- technická univerzita Ostrava
VÚHŽ a. s.	Výzkumný ústav hutnictví železa a. s.

ÚVOD

Současná strojírenská výroba klade velký důraz na úspory materiálu při konstruování nových strojních dílů a konstrukcí při současném zachování mechanických vlastností hotového výrobku. Další trendem moderní strojírenské výroby je minimalizace rozměrů vyráběných součástí při snaze neustále zlepšovat jejich vlastnosti. Tento trend je udržitelný zejména díky použití nových materiálů, které jsou charakteristické jemnozrnnou strukturou a dobrými mechanickými vlastnostmi.

V rámci výroby jemnozrnných materiálů proto probíhá výzkum nekonvenčních metod tváření, které umožňují výrobu tzv. UFG materiálů. Tyto materiály se vyznačují ultra jemnozrnnou strukturou a velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Výrobu těchto materiálů umožňují metody tváření využívající procesu vícenásobné plastické deformace (SPD). Dílčím cílem této práce je rešerše nových metod tváření s využitím procesu SPD. Metody tváření využívající procesu vícenásobné plastické deformace jsou známy již delší dobu, v současnosti však pokračuje jejich vývoj a výzkum a to jak na uhlíkových ocelích, tak na mnohých neželezných kovech a jejich slitinách.

Hlavním cílem diplomové práce je provedení experimentů na oceli DC01 procesem vícenásobné plastické deformace (metoda DRECE) s úhlem nástroje 108° . V diplomové práci je zkoumán vliv protlačovacího procesu na výsledné mechanické vlastnosti a strukturu dané oceli. V práci byl dále ověřován vlivu počtu průchodů tvářecím zařízením na výsledné mechanické vlastnosti oceli DC01.

1 VÍCENÁSOBNÁ PLASTICKÁ DEFORMACE

Procesy vícenásobné plastické deformace jsou charakteristické dosažením ultra jemnozrnné struktury (UFG struktury) a zásadním nárůstem mechanických vlastností tvářeného materiálu pomocí vložení velké plastické deformace do tvářeného materiálu.

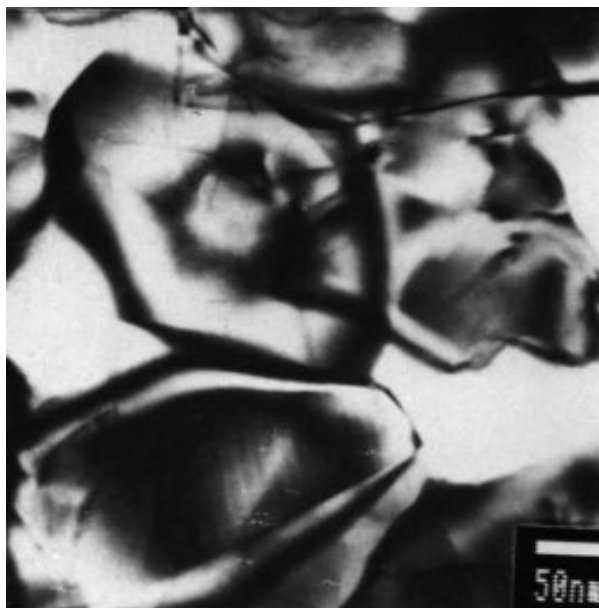
[1, 2, 3, 4]

Procesy tváření využívající vícenásobnou plastickou deformaci materiálu (severe plastic deformations- SPD) způsobují zásadní změny v mikrostruktuře, mechanických vlastnostech a zrnitosti tvářených materiálů. Při modelování vývoje změny vlastností materiálu je zapotřebí neustále sledovat aktuální polohu deformace tvářeného vzorku. [1, 2, 3, 4]. Průběh mikrostruktury se stanovuje ve dvou krocích. V prvním kroku se sleduje deformace materiálu ve vybraných bodech materiálu, tyto body se vytvářejí pomocí standardních deformačních sítí. V tomto kroku je možno z hodnot vytvrzování materiálů v jednotlivých měřených bodech poměrně snadno stanovit velikost vložené deformace do materiálu. Ve druhém kroku se aplikují mikromechanické modely plasticity a vývoj mikrostruktury se analyzuje společně s deformační trajektorií pomocí bodů definovaných v prvním kroku. [5]

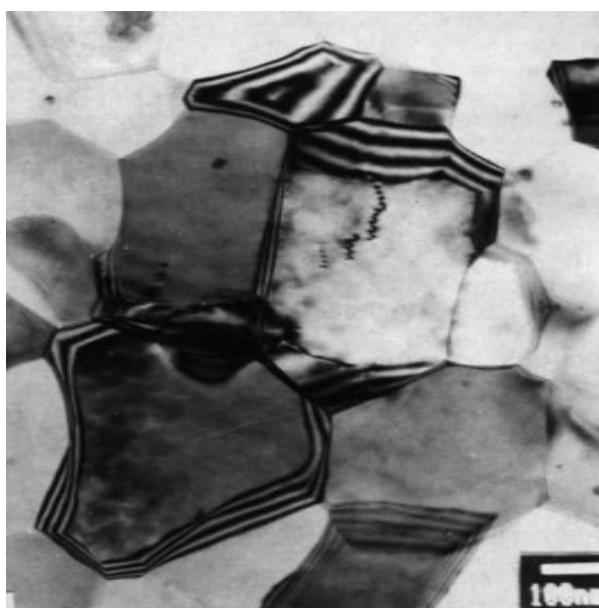
1.1 Ultra jemnozrnné materiály

V oblasti vývoje ultra jemnozrnných materiálů (ultrafine-grained materials- UFG materiály) byla provedena celá řada výzkumných prací. Výzkumem bylo zjištěno, že metody tváření využívající vícenásobné plastické deformace jsou velmi efektivní v oblasti produkce UFG materiálů. [6, 7, 8, 9, 10] Metody SPD umožňují dosažení velikosti zrn 100 až 200 nm. [10] Výslednou velikost zrn lze ovlivnit upravením parametrů tváření, například zvýšením deformačního tlaku, popřípadě snížením teploty materiálu při tváření. Významný vliv na výslednou velikost zrn má rovněž chemické složení tvářeného materiálu. Velikost zrn ovlivňuje zejména míra legování tvářeného materiálu intersticiálními atomy. [11, 12]

UFG slitiny tvářené pomocí metod využívajících SPD představují nové materiály, jež jsou charakteristické neobvyklými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Slitiny tvářené metodami SPD dosahují nárůstu elasticity, pevnosti, nebo houževnatosti. U UFG slitin je rovněž patrný vznik superplasticity. [6] Na Obr.1 je transmisním elektronovým mikroskopem znázorněna UFG struktura slitiny Al-4%,Cu-0.5% Zr tvářená metodou SPD. Na Obr. 2 je znázorněna stejná slitina, u které bylo navíc přidáno žíhání po dobu jedné hodiny. [13]



Obr. 1 UFG struktura slitiny Al-4%,Cu-0.5% Zr [13]

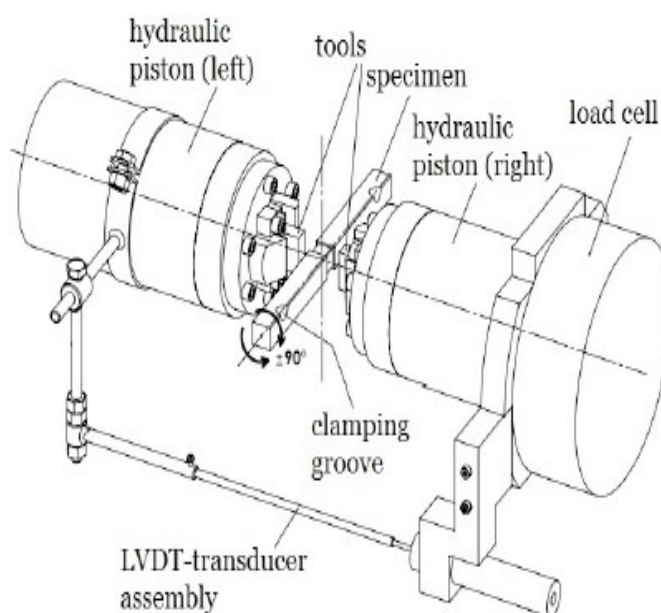


Obr. 2 UFG struktura slitiny Al-4%,Cu-0.5% Zr s přidáním žíhání 1 h [13]

2 METODY SPD POUŽÍVANÉ PRO TVORBU UFG MATERIÁLŮ

2. 1 Cyclic Severe plastic deformation

Tato metoda je založená na cyklickém víceosém tváření materiálu. Tato metoda umožňuje použití deformace na celé řadě kovů a jejich slitin za pokojové teploty, popřípadě za zvýšených teplot. Princip této metody spočívá v tom, že dva mimoběžné písty s tvářecími nástroji působí proti sobě na tvářený materiál, jež je upnutý v manipulátoru, který umožňuje jeho natáčení o úhel 90° . Při tváření touto technologií dochází k intenzivní plastické deformaci ve středové části vzorku. Schéma této metody je zobrazeno na Obr. 3. [14]



Obr. 3 Schéma metody víceosého tváření [14]

Tato metoda byla experimentálně ověřena na tepelně zpracované hliníkové slitině AlSi1MgMn . Experiment byl proveden na termo-mechanickém simulátoru Gleeble 3800. Experiment byl proveden na deseti vzorcích, přičemž první byl tvářen jednou a desátý byl tvářen desetkrát. Naměřené hodnoty smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) a meze pevnosti (R_m) vykazují značný nárůst ve srovnání s výchozím stavem. Tažnost (A_{80}) slitiny AlSi1MgMn naopak po jednotlivých tvářeních mírně klesá. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v Tab. 1. [14]

Tab. 1 Výsledné mechanické vlastnosti slitiny AlSi1MgMn [14]

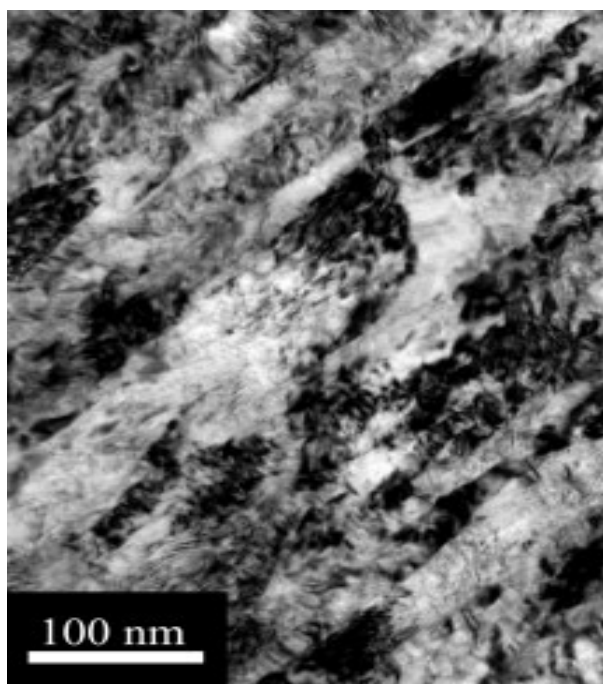
	Initial state	Applied forging passes [-]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{p0.2}$ [MPa]	86.0	142.5	141.2	147.0	165.3	150.3	149.5	155.8	156.3	150.7	183.9
R_m [MPa]	101.5	173.0	155.6	157.7	187.4	168.4	185.9	184.2	185.5	176.8	210.1
A [%]	45.4	17.1	25.1	18.9	21.4	23.5	23.9	19.3	21.2	22.5	16.1

2.2 Multidirectional forging and unidirectional bar rolling

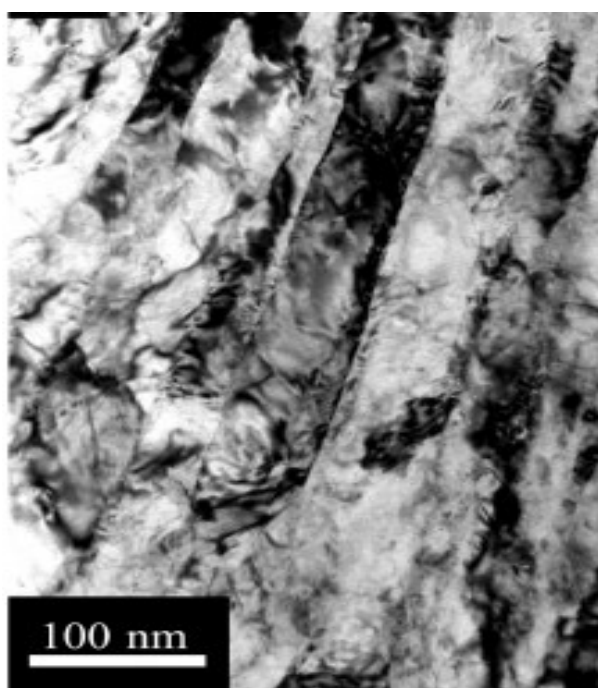
Tato metoda spočívá v provádění několika stupňové komprese, kdy mezi jednotlivými stačeními dochází k pootočení osy působení tlaku o úhel 90°. Vyvíjené napětí se mezi jednotlivými kompresemi postupně zvyšuje. Pro více směrové kování se používají vzorky ve tvaru kvádru, pro jedno směrové válcování jsou vzorky tyčového tvaru. Tváření těmito metodami probíhá při pokojové teplotě. [15]

U této metody byl proveden výzkum na austenitické oceli 316L. Austenitické oceli jsou velmi významným materiálem, jelikož jsou výjimečné svými mechanickými, fyzikálními a technologickými parametry. [17, 18] Aplikace austenitických ocelí je však poměrně značně omezena jejich poměrně nízkou smluvní mezí kluzu ($R_{p0.2}$). Je tedy snaha procesy SPD smluvní mez kluzu ($R_{p0.2}$) zvýšit. [19]

Metoda víceosého kování austenitické oceli 316L a jednoosého válcování tyčí z austenitické oceli 316L prokázala pokles velikosti zrna na 60 nm a vzrůst smluvní meze kluzu ($R_{p0.2}$) na 5380 MPa. Tvářením těmito metodami dochází ke značnému nárůstu mechanických vlastností austenitické oceli a tím k rozšíření možné aplikace oceli na trhu. [15] Na Obr. 4 a Obr. 5 jsou znázorněny odlišné mikrostruktury po více směrovém kování a jednoosém válcování tyčí. Mikrostruktura je zobrazena po stejném zatížení.



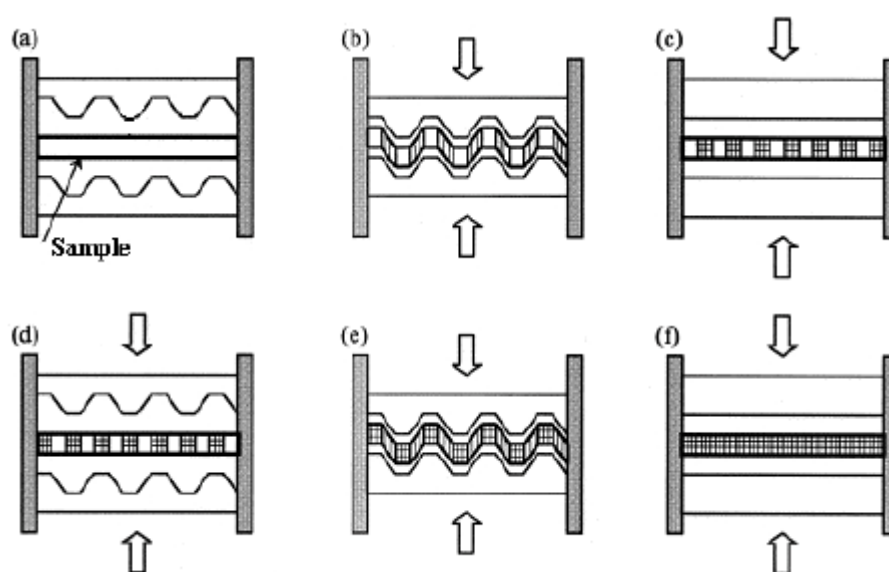
Obr. 4 Mikrostruktura vzorku tvářeného metodou Multidirectional forging [15]



Obr. 5 Mikrostruktura vzorku tvářeného metodou Unidirectional bar rolling [15]

2.3 Constrained groove pressing (CGP)

Tato metoda je charakteristická navýšením mechanických vlastností bez zjevných změn rozměrů tvářeného materiálu. Proces tváření metodou CGP se skládá ze čtyř základních částí. V prvním kroku je plochý vzorek vložen do tvarové tvářecí matrice a dochází k lisování profilu na vzorku, poté dochází k plošné kompresi materiálu, následuje otočení materiálu a opětovné lisování profilu na vzorek a v závěrečné části je materiál opět plošně vyrovnán. [16] Princip této metody je zobrazen na Obr. 6.

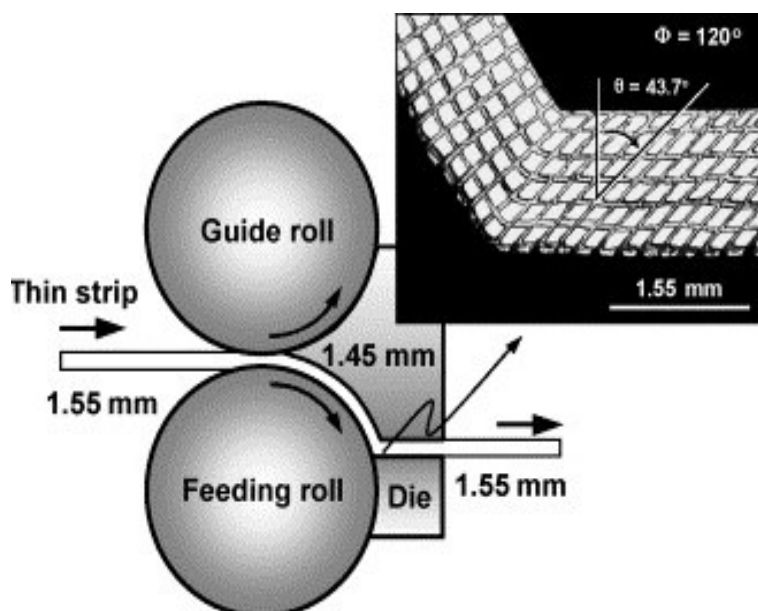


Obr. 6 Princip metody CGP [16]

Tato metoda byla použita pro výzkum hořčíkové slitiny AZ31. Výsledky provedeného experimentu jasně prokázaly nárůst mikrotvrdosti, změnu mikrostruktury a zejména pokles velikosti zrna z 200 μm na 20 μm již po jednom cyklu. Při provádění experimentu na této slitině došlo k mírnému poklesu tloušťky vzorku. [20]

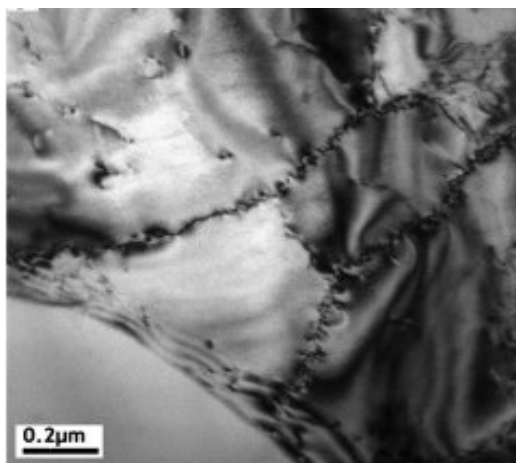
2.4 Dissimilar Channel Angular Pressing (DCAP)

Metoda DCAP je založena na kontinuálním přivádění tvářeného materiálu pomocí podávacího válce do místa deformace. Kontinuální přivádění umožňuje nepřetržitý provoz této metody a tím značně zvyšuje její efektivitu. Metoda Dissimilar channel angular pressing je charakteristická rovněž tvářecí mezerou v zóně deformace. Mezera u vstupního a výstupního válce je mírně větší než mezera v zóně deformace. Napojení vstupního a výstupního válce je u metody DCAP provedeno pod úhlem od 120° do 130° . Tvářecí rychlost je v rozmezí od 5 do $50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. [21] Schéma této metody je zobrazena na Obr. 7.



Obr. 7 Schéma metody DCAP [21]

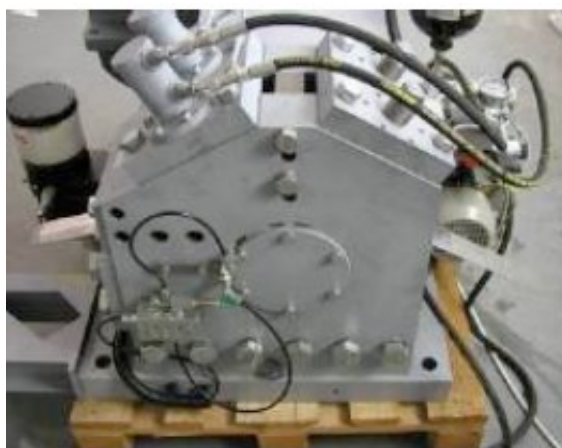
U této metody byl proveden výzkum na hliníkové slitině Al 6061. Výsledkem tohoto experimentu bylo zjištění, že u této hliníkové slitiny dochází k výraznému zvýšení hustoty dislokací a ke tvorbě ultrajemnozrné struktury. Analýza hliníkové slitiny Al 6061 na transmisním elektronovém mikroskopu potvrdila, že vlivem metody DCAP dochází ke značnému zjemnění zrn materiálu. [22] Na Obr. 8 je zobrazena mikrostruktura hliníkové slitiny Al 6061 po jednom průchodu.



Obr. 8 Mikrostruktura Al 6061- první průchod [22]

2.5 Daul rolls equal channel extrusion (DRECE)

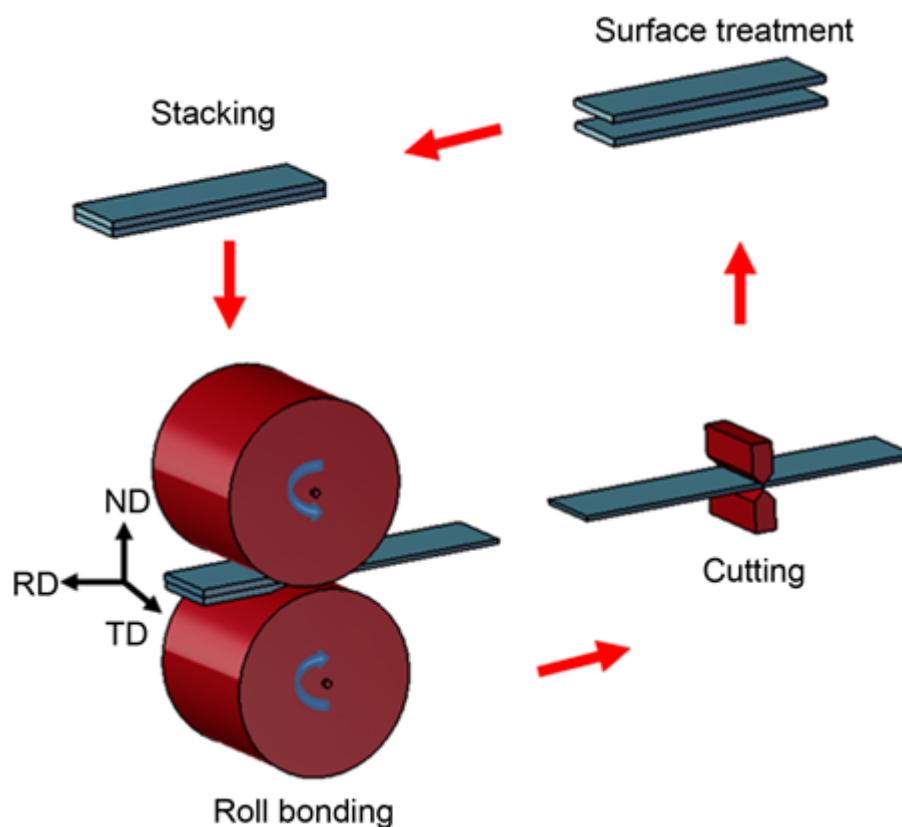
Metoda DRECE patří do perspektivní skupiny technologií využívajících vícenásobné plastické deformace. Metoda DRECE je vhodná zejména pro tváření kovových materiálů. Při tváření touto metodou dochází ke zmenšení velikosti zrn materiálů na hodnoty 10 μm a nižší v závislosti na ověřovaném materiálu. Materiály tvářené touto technologií se vyznačují nárůstem mechanických vlastností, zejména dochází k zásadnímu navýšení smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) a meze pevnosti (R_m) při zanechání dostatečné tažnosti materiálu (A_{80}). Metoda DRECE je založena na protlačování pásu plechu tvářecím nástrojem, který vytváří v zóně deformace materiálu úhel tváření 108° nebo 113°. Pohyb pásu plechu je zajištěn pomocí válců, které třením uvádějí plech do pohybu. [23] Prototypové zařízení využívající metodu DRECE je zobrazeno na Obr. 9.



Obr. 9 Metoda DRECE [23]

2.6 Accumulative roll bonding (ARB)

Princip metody ARB je založen na několika základních krocích. V první fázi je nutné položit jeden pás plechu na druhý, poté následuje válcování obou plechů. Válcováním dochází k pevnému spojení obou pásů. V další fázi je daný pás opětovně rozdělen na dvě poloviny. Následuje úprava hran plechů a celý proces se opakuje znovu. Metoda ARB je prováděna za zvýšené teploty. Teplota je volena v závislosti na tvářeném materiálu, vždy je však nižší než teplota rekrytalizace daného materiálu. V případě volby nízké teploty tvářený materiál dosahuje nedostatečné tažnosti a vzniklý spoj je nedostatečně pevný. [24] Proces tváření metodou ARB je charakteristický tím, že v průběhu tváření nedochází ke změně geometrie materiálu, jelikož při každém válcování dochází ke zmenšení tloušťky o 50 % a zvětšení šířky materiálu je zanedbatelné. [25] Princip této metody je zobrazen na Obr. 10.



Obr. 10 Princip metody ARB [26]

Pro praktické ověření teoretických poznatků byl metodou ARB proveden experiment na hliníkovém materiálu Al 1100. [25] V Tab. 2 jsou uvedeny technické parametry tváření této slitiny metodou ARB.

Tab. 2 Parametry tváření ARB [25]

Material	Heating	Roll diameter (mm)	Roll speed (m/min)	Mean strain rate (/s)
Al (1100)	473 K×5 min	255	10	12

V Tab. 3 jsou uvedeny mechanické vlastnosti materiálu Al 1100. V tabulce je uvedena mez pevnosti (R_m) a tažnost materiálu (A_{80}) ve výchozím stavu a po osmi průchodech metodou ARB.

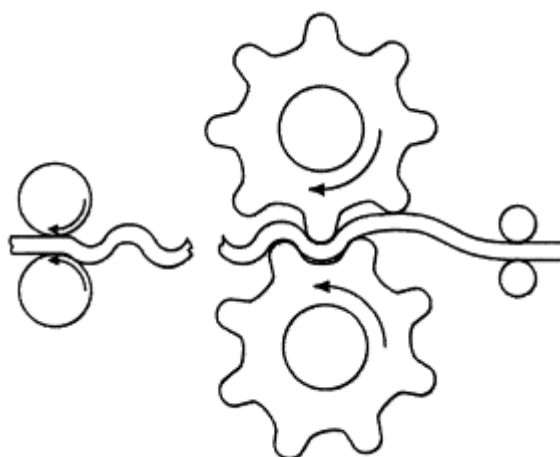
Tab. 3 Mechanické vlastnosti Al 1100 [25]

Material	No. of cycles	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Al (1100)	0 (initial)	84	42
Al (1100)	8	304	8

Z výsledků provedeného experimentu je zřejmé, že v materiálu dochází k velmi výraznému nárůstu meze pevnosti (R_m). Mez pevnosti (R_m) tohoto materiálu se tvářením zvýšila o 220 MPa. Při vyhodnocení experimentu na materiálu Al 1100 však došlo k zjištění, že dochází ke značnému poklesu tažnosti (A_{80}) tvářeného materiálu. [25]

2.7 Repetitive corrugation and straightening (RCS)

Metoda RCS patří mezi metody SPD, které jsou schopny produkovat UFG materiály ve velkosériové průmyslové výrobě. [27] Princip tváření materiálu metodou RCS spočívá v tom, že je materiál deformován a opětovně rovnán aniž by docházelo k výrazné změně geometrie průřezu tvářeného vzorku. Proces ohýbání a opětovného rovnání zapříčiňuje vnesení velké plastické deformace do tvářeného materiálu, která způsobuje dosažení výrazného zjemnění struktury materiálu. Konstrukce zařízení využívající metodu RCS umožňuje vícenásobné opakování procesu ohýbání a opětovného rovnání materiálu. [28] Na Obr. 11 je znázorněn princip této metody.

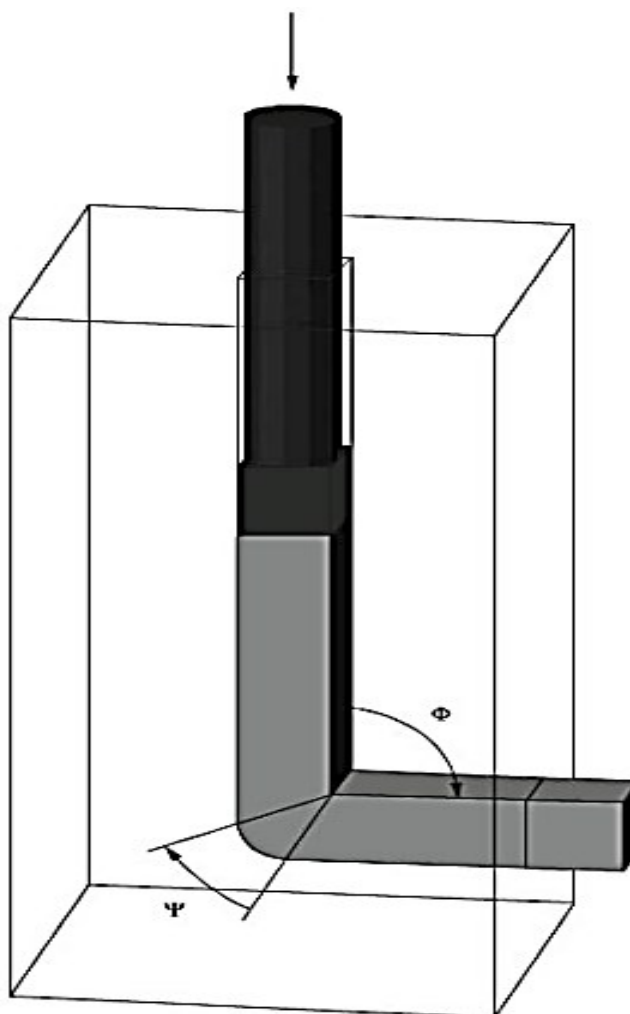


Obr. 11 Princip metody RCS [28]

V rámci vývoje této metody byl proveden experiment na měděných tyčích s vysokou chemickou čistotou. Experimentem byly prokázány teoretické poznatky o této metodě. Pomocí analýzy mikrostruktury na transmisním elektronovém mikroskopu bylo zjištěno snížení velikosti zrna měděné tyče ze 765 μm na 500 nm. Výsledky experimentu v případě zařazení vícenásobného průchodu tvářecím zařízením prokázaly vhodnost nasazení metody RCS do velkosériové průmyslové výroby. [28]

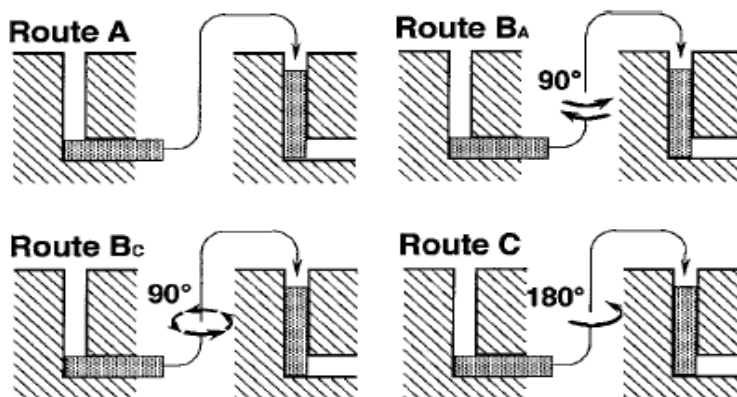
2.8 Equal-channel angular pressing (ECAP)

Metoda ECAP patří mezi nejčastěji používané metody vícenásobné plastické deformace. Metoda ECAP je charakteristická protlačováním vzorku (nejčastěji čtvercového nebo kruhového průřezu) kovovou maticí. Protlačovací matrice obsahuje dva kanály, které jsou navzájem napojeny nejčastěji pod úhlem 90° . Proces zjemnění struktury materiálu a jeho zpevnění je u této metody vyvolán prostým stříhem, který nastává při protlačení vzorku kanálem tvářecí matrice. Pro zvýšení účinku metody ECAP je možné protlačovat vzorek vícenásobně. Schéma této metody je zobrazeno na Obr. 12, kde jsou rovněž uvedeny dva základní úhly charakterizující tvářecí matici. Úhel Ψ definuje úhel zakřivení v průsečíku mezi kanály a úhel Φ definuje úhel mezi kanály. [29]



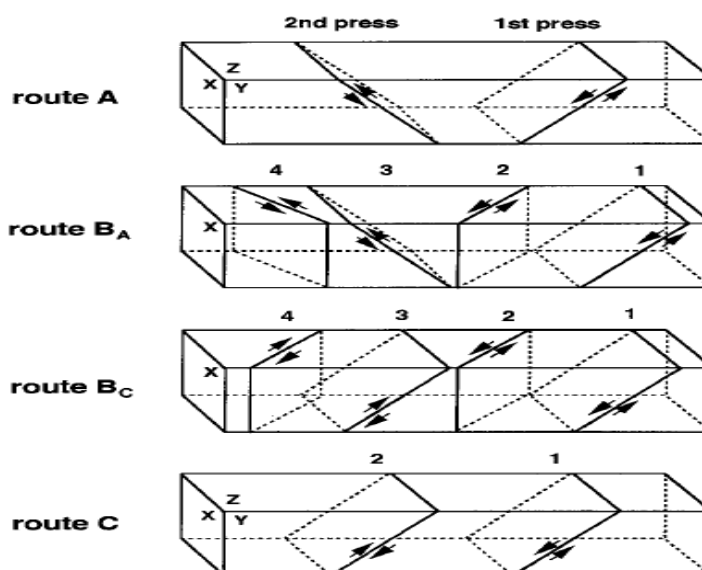
Obr. 12 Princip metody ECAP [29]

Velmi důležitým poznatkem z aplikace metody ECAP je dosažení vyšší hodnoty velikosti intenzity deformace a tímto i přetvoření materiálu v jednotlivých průchodech tvářecím nástrojem. Zároveň dochází i k významnému zjemnění struktury po jednotlivých průchodech. Experimenty bylo zjištěno, že výsledná mikrostruktura tvářeného materiálu je závislá na úhlu mezi kanály tvářecí matrice a na způsobu opakování protlačování vzorku matricí, není však závislá na rychlosti protlačování vzorku tvářecí matricí. [30]. Způsob protlačování tvářecí matricí je zobrazen na Obr. 13.



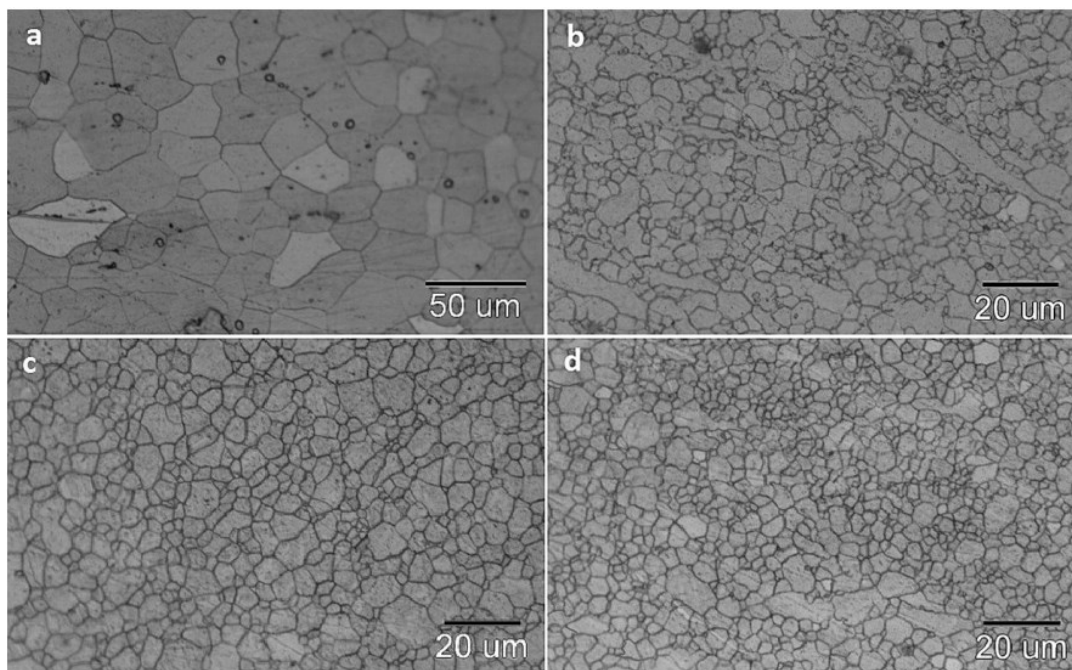
Obr. 13 Způsob protlačování vzorku [29]

Jednotlivé základní způsoby protlačování vzorků tvářecí matricí, jež jsou zobrazeny na Obr. 13, vytváří odlišné střížné roviny ve tvářeném materiálu a ty ovlivňují výsledné mechanické vlastnosti ověřovaných materiálů. Typy vzniklých střížných rovin jsou zobrazeny na Obr. 14. [31]



Obr. 14 Střížné roviny [29]

Na Obr. 15 je zobrazen vývoj mikrostruktury hořčikové slitiny AZ31 tvářené metodou ECAP způsobem protlačování C (způsob protlačování viz. Obr.13).



Obr. 15 Mikrostruktura hořčikové slitiny AZ31 při teplotě 200°C a) výchozí stav b) po 1. průchodu c) po 2. průchodu d) po 4. průchodu [32]

Z metalografických snímků zobrazených na Obr. 15 je zcela patrný vliv metody ECAP na mikrostrukturu tvářené hořčikové slitiny AZ31. Hořčiková slitina AZ31 měla ve výchozím stavu výrazně větší velikost zrn než po jednotlivých průchodech tvářecím zařízením. Rozdíl je nejmarkantnější při srovnání výchozího stavu a čtvrtého průchodu. Metalografické snímky jednoznačně potvrdily vhodnost použití metody ECAP pro zjemňování struktury tvářeného materiálu. [32]

3 EXPERIMENTÁLNÍ PRÁCE

3.1 Plán experimentů

- 1) Volba vhodné oceli (DC01)- dle dřívějších experimentů a požadavků praxe (firma Hobes Horní Benešov s. r. o. vyrábí z dané oceli díly dveřních zámků).
- 2) Určení vhodné velikosti úhlu v zóně deformace (úhel 108°)- dle předchozích výsledků ověřování různých velikostí úhlů u ocelí.
- 3) Volba vhodných technologických parametrů (tlaky přítlačných válců a rychlost podávání plechu)- dle předchozích výzkumných prací.
- 4) Ověření vlivu počtu průchodů pásu plechu tvářecím nástrojem z hlediska dosažení požadovaných mechanických i tvářecích parametrů ověřované oceli.
- 5) Zkoumání vlivu anizotropie plechu.
- 6) Analýza procesu SPD z hlediska dosažení požadovaných mechanických vlastností i tvářitelnosti jak rovněž i struktury oceli DC01.

3.2 Charakteristika tvářené oceli

V rámci této práce byl proveden experiment na oceli DC01. Tato ocel je určená pro ohýbání, lemování za studena nebo výrobu výlisků. Pro danou ocel bylo v laboratoři CPIT na VŠB- TUO zjištěno metodou optické emisní spektroskopie GDOES chemické složení. Chemické složení oceli DC01 je uvedeno v Tab. 4.

Tab. 4 Chemické složení oceli DC01

C [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]
0,050	0,203	0,020	0,014	0,008	0,053	0,056	0,005	0,075
Ti [%]	Co [%]	B [%]	Pb [%]	V [%]	W [%]	Al [%]	Nb [%]	
<0,001	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,050	<0,001	

V Tab. 5 jsou uvedeny mechanické vlastnosti oceli DC01 garantovány prodejcem této oceli.

Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli DC01 [33]

Označení oceli	Mechanické vlastnosti		
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
	280	270 - 410	28

Experimenty byly provedeny na osmi pásech plechu z oceli DC01. Tloušťka tvářených pásů je 2 mm, šířka pásů je 59 mm a délka pásů je 1000 mm. Rozměry pásů jsou limitovány pouze konstrukčním řešením tvářecího zařízení. Při provedení konstrukčních úprav tvářecího zařízení by bylo možné metodu DRECE použít v širší škále rozměrů pásů.

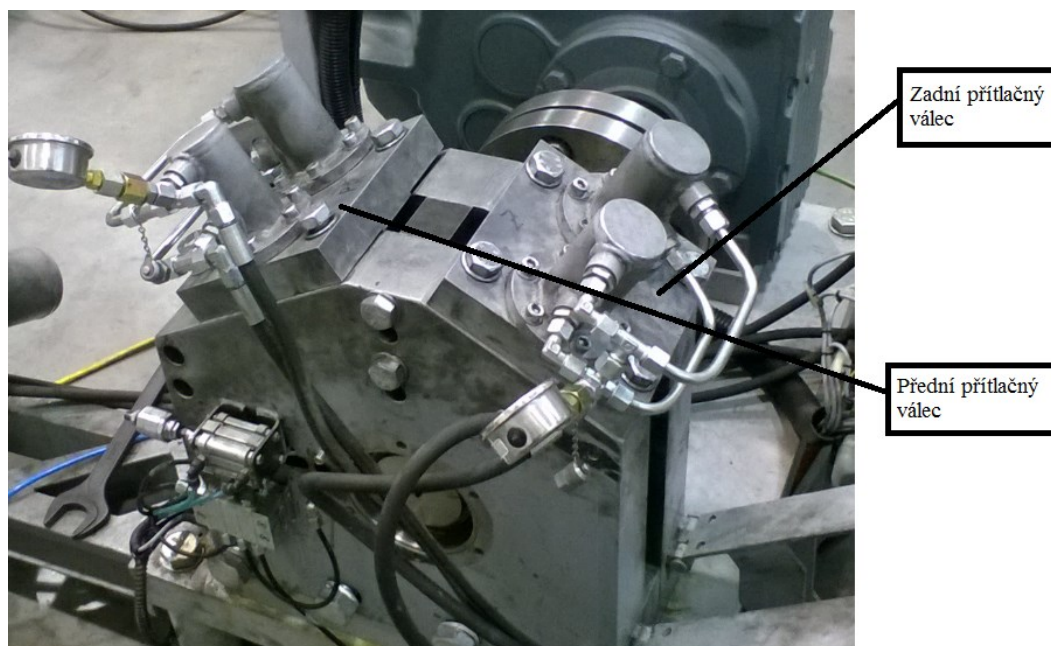
3.3 Experiment metodou DRECE

Vlastní experiment byl proveden na prototypovém zařízení, které bylo navrženo v rámci výzkumu na VŠB- TU Ostrava. Experiment byl proveden na tvářecím zařízení, jež využívá procesu vícenásobné plastické deformace DRECE. Princip metody DRECE je objasněn v kapitole Metody SPD používané pro tvorbu UFG materiálů. Dané zařízení využívající metodu DRECE je zobrazeno na Obr. 16.



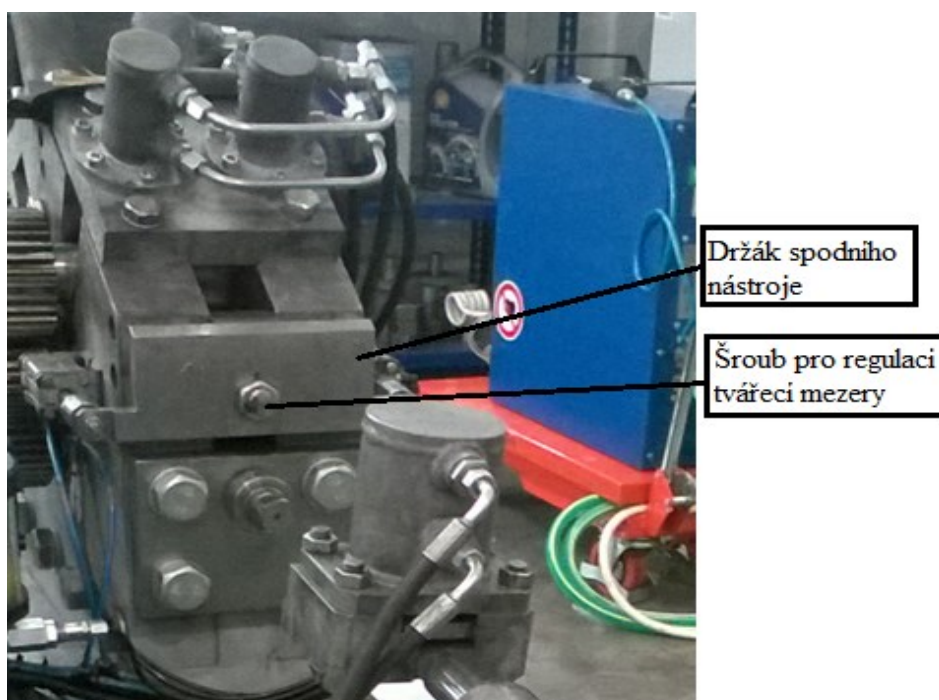
Obr. 16 Metoda DRECE

Prostřednictvím tvářecího zařízení využívajícího metodu vícenásobné plastické deformace DRECE bylo provedeno protlačování pásů plechů oceli DC01. Bylo provedeno vícenásobné protlačení pásů jedním až sedmi průchody tímto zařízením. Experiment byl proveden na tvářecím nástroji, který vytváří úhel v zóně deformace materiálu 108° . Experiment byl proveden na všech pásech za stejných tvářecích podmínek. Na tvářecím zařízení byl nastaven tlak zadního přítlačného válce 40 MPa a tlak předního přítlačného válce 200 MPa. Tlak přítlačných válců je vyvozován pomocí hydraulických pístů a vybavení tvářecího zařízení umožňuje jeho poměrně přesnou regulaci. Na Obr. 17 je zobrazena metoda DRECE s konkretizováním umístění přítlačných válců. Z důvodu maximální efektivity protlačování jednotlivých pásů plechů byla na tvářecím zařízení nastavena pro všechny průchody maximální rychlost protlačování pásů ($20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$).



Obr. 17 Přitlačné válce tvářecího zařízení

Při provádění experimentu na tvářecím zařízení využívajícím metodu DRECE dochází k protlačování pásu plechu mezi horním a dolním nástrojem. Pro správný průběh experimentu je nezbytné přesné seřízení mezery mezi horním a dolním nástrojem. Seřízení tvářecí mezery mezi nástroji se provádí pomocí šroubu, který je umístěn v přípravku, jež uchycuje spodní nástroj. Schéma regulace tvářecí mezery je zobrazeno na Obr. 18.



Obr. 18 Regulace tvářecí mezery

4 ANALÝZA VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

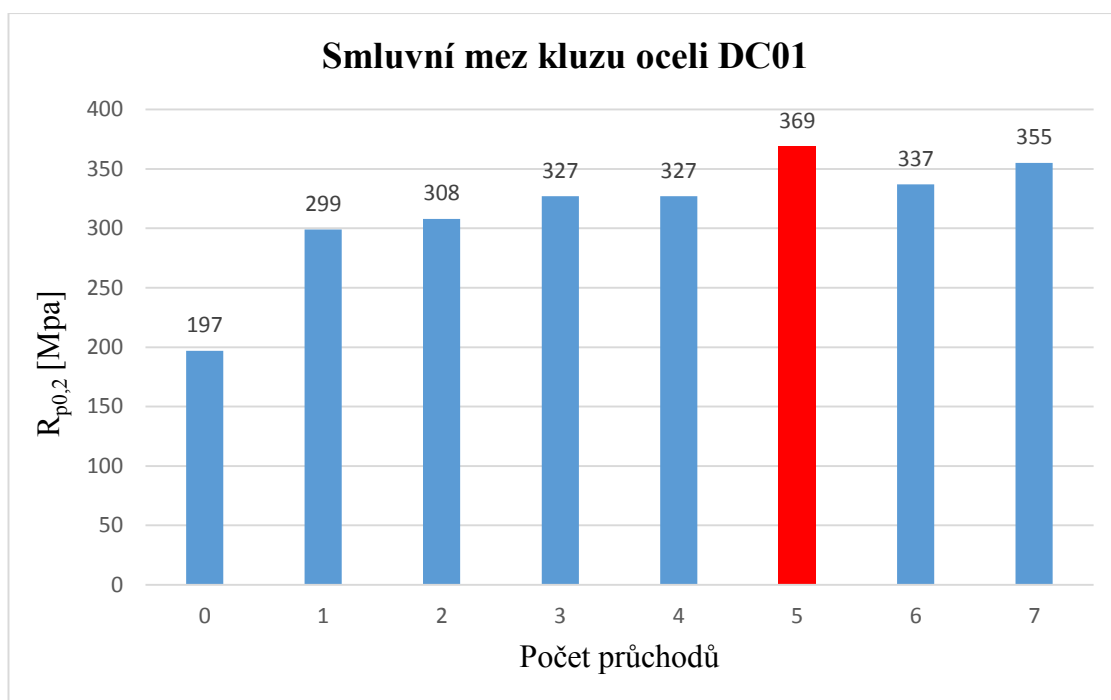
4.1 Mechanické vlastnosti

Tahové zkoušky na pásu plechu oceli DC01 byly provedeny dle normy ČSN EN ISO 6892-1 (420310) v Laboratoři mechanických vlastností VÚHŽ a. s. Dobrá. Požadovaným výsledkem tahových zkoušek bylo stanovení výsledných mechanických vlastností tvářených plechů ve výchozím stavu a po jednotlivých průchodech tvářecím nástrojem DRECE. V Tab. 5. jsou uvedeny hodnoty mechanických vlastností získané provedením tahových zkoušek po jednotlivých průchodech.

Tab. 5 Naměřené mechanické vlastnosti oceli DC01

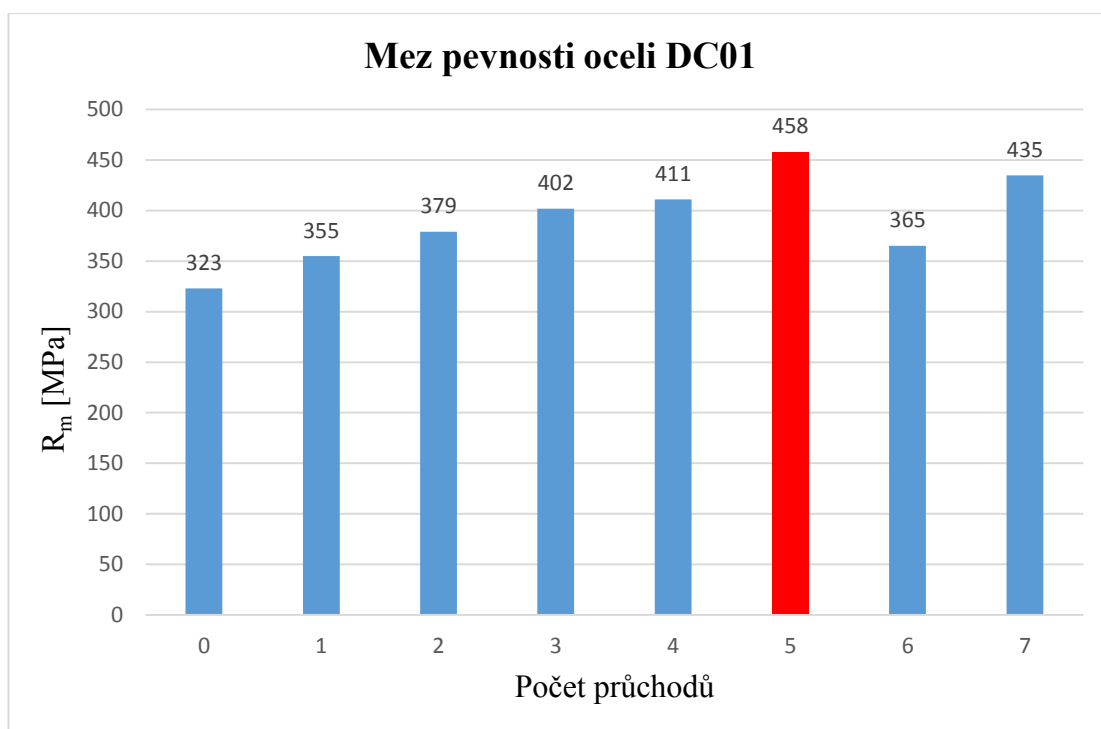
	Mechanické vlastnosti				
Počet průchodů	$F_{p0,2}$ [N]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
0 (VS)	22 300	36 500	197	323	66,0
1	32 000	38 000	299	355	40,5
2	33 000	40 500	308	379	29,5
3	35 000	43 000	327	402	27,0
4	35 000	44 000	327	411	22,9
5	39 500	49 000	369	458	21,9
6	36 000	39 000	337	365	20,5
7	38 000	46 500	355	435	19,4

Na základě naměřených hodnot mechanických vlastností oceli DC01 uvedených v Tab. 5 byly sestaveny grafy vyjadřující závislost mechanických vlastností na počtu průchodů tvářeného pásu plechu tvářecím nástrojem DRECE (Graf 1, Graf 2 a Graf 3).



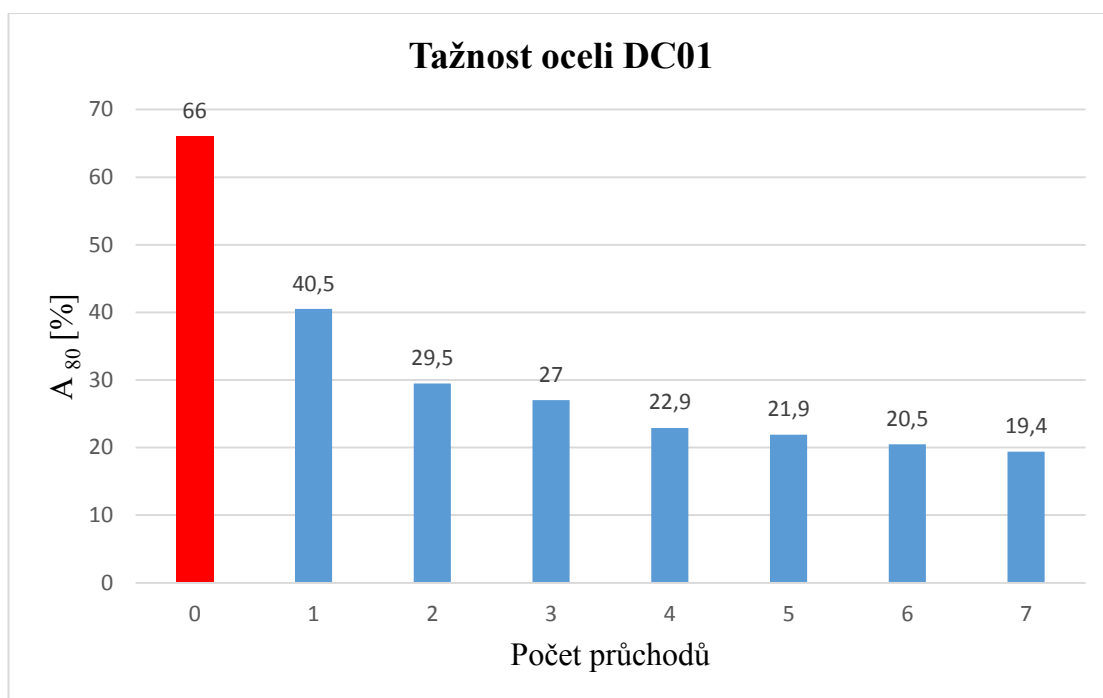
Graf 1 Závislost smluvní meze kluzu oceli DC01 na počtu průchodů

Z Grafu 1 je zřejmý nárůst smluvní meze kluzu ($R_{p0.2}$) oceli DC01 po jednotlivých průchodech tvářecím zařízením využívajícím metodu DRECE. Nejvýznamnější nárůst smluvní meze kluzu nastává po 1. průchodu tvářecím zařízením. Smluvní mez kluzu ($R_{p0.2}$) je po 1. průchodu navýšená o 102 MPa (51,8 %) ve srovnání s výchozím stavem oceli. U následujících průchodů je rovněž patrný nárůst smluvní meze kluzu ($R_{p0.2}$), nikoliv však tak výrazný jako po prvním průchodu. Maximální hodnoty $R_{p0.2}$ bylo dosaženo po 5. průchodu oceli tvářecím zařízením. Nárůst po 5. průchodu byl ve srovnání s výchozím stavem o 172 MPa, tedy o 87 %.



Graf 2 Závislost meze pevnosti oceli DC01 na počtu průchodů

Graf 2 potvrzuje teoreticky předpokládaný nárůst meze pevnosti (R_m) oceli DC01 po jednotlivých průchodech tvářecí metodou DRECE. Z tohoto grafu je zřejmý nárůst meze pevnosti až do 5. průchodu, kdy bylo dosaženo jejího maxima. Po 6. průchodu došlo k poklesu meze pevnosti (R_m) a po 7. průchodu je zjevný opětovný nárůst meze pevnosti. Nejvýznamnější nárůst meze pevnosti (R_m) nastává po 1. průchodu tvářecím zařízením, kdy byl zjištěn nárůst meze pevnosti (R_m) ve srovnání s výchozím stavem ověřované oceli o 32MPa (9,9%). Po 5. průchodu došlo k největšímu nárůstu meze pevnosti, ve srovnání s výchozím stavem byl zjištěn nárůst o 135 MPa, tedy o 42 %.

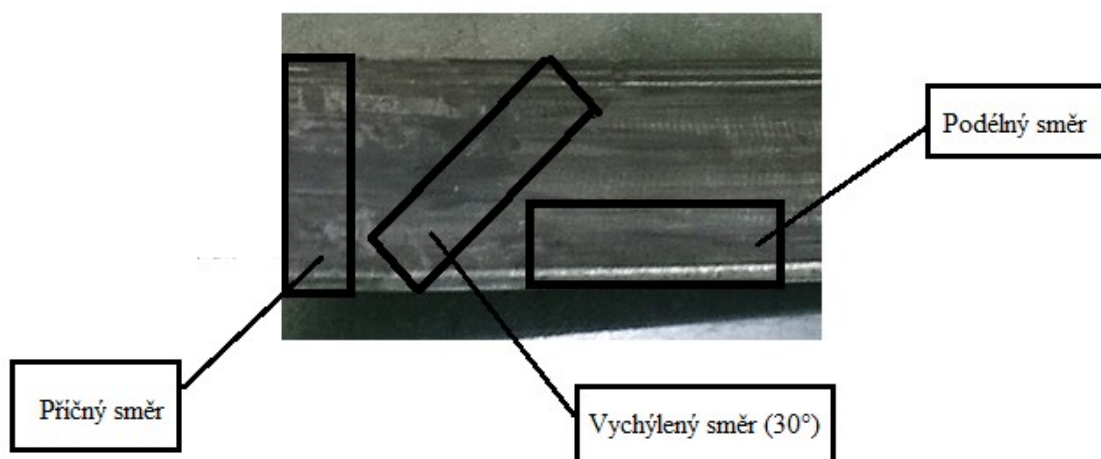


Graf 3 Závislost tažnosti oceli DC01 na počtu průchodů

Ocel DC01 je primárně určena k tažení a tváření za studena, což potvrzuje hodnota tažnosti (A_{80}) této oceli ve výchozím stavu. Z Grafu 3 jednoznačně vyplývá, že dochází k poklesu tažnosti (A_{80}) po 1. průchodu ve srovnání s výchozím stavem o 25,5%. I přes daný negativní pokles dosahuje tažnost (A_{80}) po 1. průchodu velmi vysoké hodnoty, díky níž je ocel dále velmi dobře tvárná. V následujících průchodech dochází ke kontinuálnímu poklesu tažnosti (A_{80}) této oceli. Z Grafu 3 je patrné, že tváření oceli DC01 metodou DRECE snižuje tažnost (A_{80}) této oceli, ale výsledná tažnost oceli umožňuje její další využití k následným tvářecím operacím i po 7. průchodu metodou DRECE.

4.2 Vliv anizotropie materiálu a počtu průchoďů na mechanické vlastnosti

V rámci diplomové práce byly provedeny tahové zkoušky na plechu oceli DC01 tvářené metodou DRECE za účelem stanovení vlivu anizotropie materiálu na mechanické vlastnosti oceli DC01. Tahové zkoušky byly provedeny na malých vzorcích v laboratoři CPIT na VŠB- TUO. Vzorky byly odebrány z plechu ve výchozím stavu a dále z každého průchoďu oceli tvářecím nástrojem. Z experimentálně ověřované oceli byly odebrány tři vzorky v podélném, příčném a vychýleném směru. Úhel vychýlení je 30° vůči podélnému směru. Schéma odebraných vzorků z pásu plechu je zobrazeno na Obr. 19.



Obr. 19 Schéma vzorků pro tahové zkoušky

Na Obr. 20 jsou zobrazeny reálné vzorky, které byly odebrány z ověřované oceli a následně podrobeny tahové zkoušce v laboratoři CPIT na VŠB- TUO.



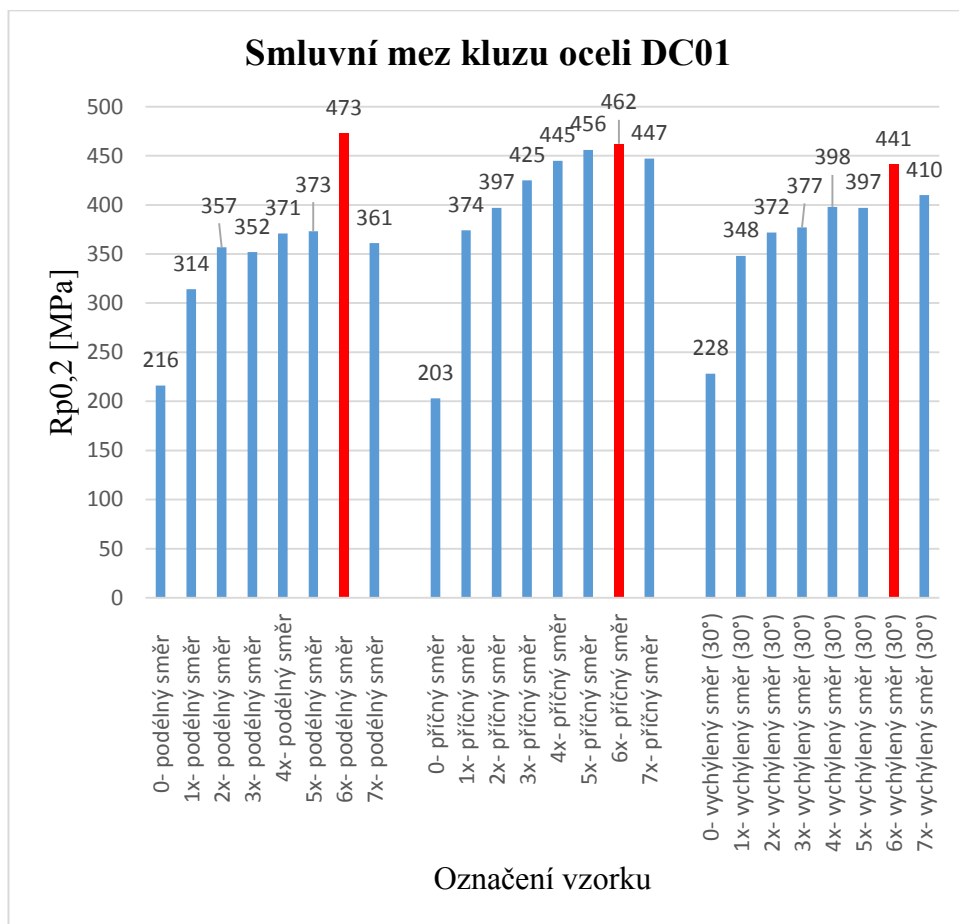
Obr. 20 Vzorky pro tahové zkoušky

V Tab. 6 jsou uvedeny aritmetické průměry výsledků tahových zkoušek provedených na malých vzorcích v laboratoři CPIT na VŠB- TUO ze tří vzorků v každém směru.

Tab. 6 Mechanické vlastnosti oceli DC01

Označení	F_m [N]	R_{p0,2} [MPa]	R_m [MPa]	A₈₀ [%]	E [Mpa]
0 (VS)- podélný směr	3330	216	335	55,3	164000
1x- podélný směr	3480	314	355	38,9	151000
2x- podélný směr	3740	357	381	32,6	121000
3x- podélný směr	3990	352	391	25,4	174000
4x- podélný směr	3840	371	402	23,2	209000
5x- podélný směr	4230	373	419	23,9	235000
6x- podélný směr	3890	473	488	19,4	191000
7x- podélný směr	4090	361	406	25,2	113000
0 (VS)- příčný směr	3290	203	338	51,2	141000
1x- příčný směr	3750	374	383	33	184000
2x- příčný směr	4080	397	409	26	192000
3x- příčný směr	4540	425	447	23	361000
4x- příčný směr	4300	445	452	22	207000
5x- příčný směr	4880	456	471	25,4	202000
6x- příčný směr	4240	462	476	23,2	199000
7x- příčný směr	4610	447	463	21,9	197000
0 (VS)- vychýlený směr (30°)	3400	228	346	49,2	178000
1x- vychýlený směr (30°)	3640	348	371	32,5	171000
2x- vychýlený směr (30°)	3980	372	404	25,4	170000
3x- vychýlený směr (30°)	4230	377	416	22,9	172000
4x- vychýlený směr (30°)	4100	398	426	22,9	209000
5x- vychýlený směr (30°)	4500	397	440	26,1	179000
6x- vychýlený směr (30°)	3790	441	458	19,7	132000
7x- vychýlený směr (30°)	4290	410	437	23,5	187000

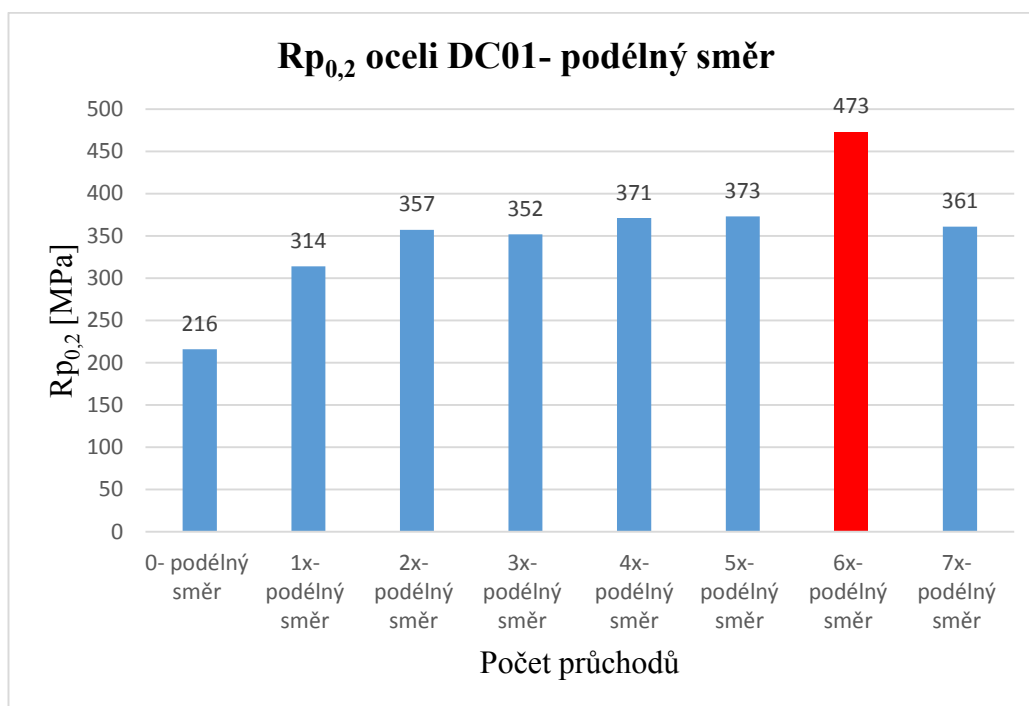
Na základě hodnot mechanických vlastností oceli DC01 získaných provedením tahových zkoušek, jež jsou zapsány v Tab. 5 byl sestrojen Graf 4. Graf 4 zobrazuje závislost smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) ověřované oceli v předem definovaných směrech na počtu protlačování.



Graf 4 Smluvní mez kluzu oceli DC01

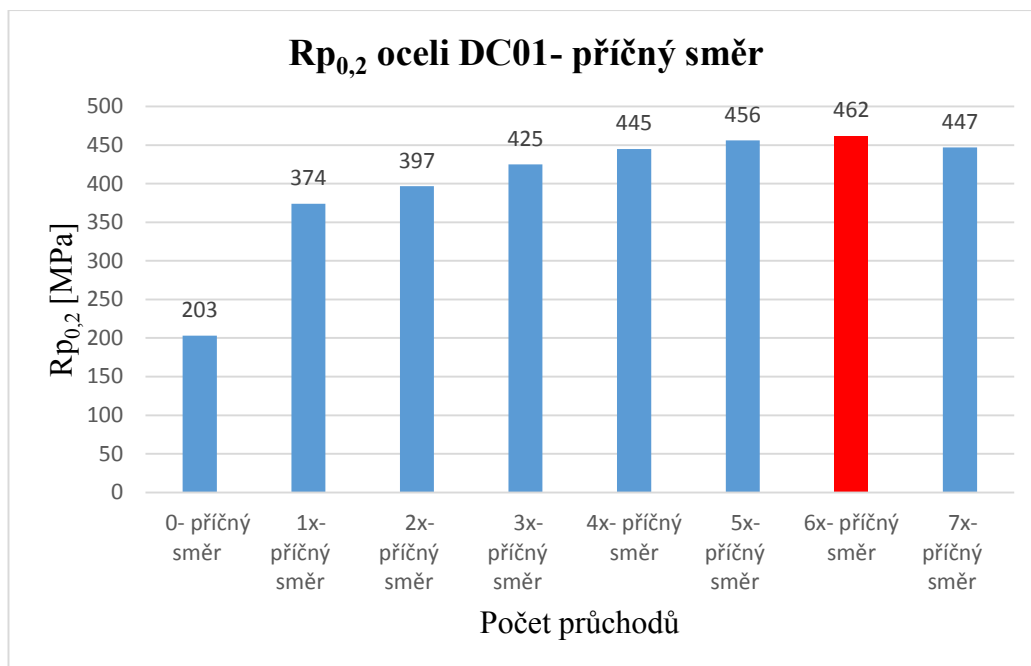
Z Grafu 4 je patrné, že velikost smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) je ve všech ověřovaných směrech obdobná. Neprokázal se tedy vliv anizotropie materiálu na smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) ověřované oceli.

Na základě hodnot mechanických vlastností oceli DC01 získaných provedením tahových zkoušek, jež jsou zapsány v Tab. 6 byly sestrojeny Grafy 5, 6 a 7, které zobrazují závislost smluvní meze kluzu v podélném, příčném a vychýleném směru tvářeného pásu plechu na počtu průchodů oceli tvářecím nástrojem DRECE. Graf 5 zobrazuje závislost smluvní meze kluzu ověřované oceli v podélném směru na počtu protlačování.



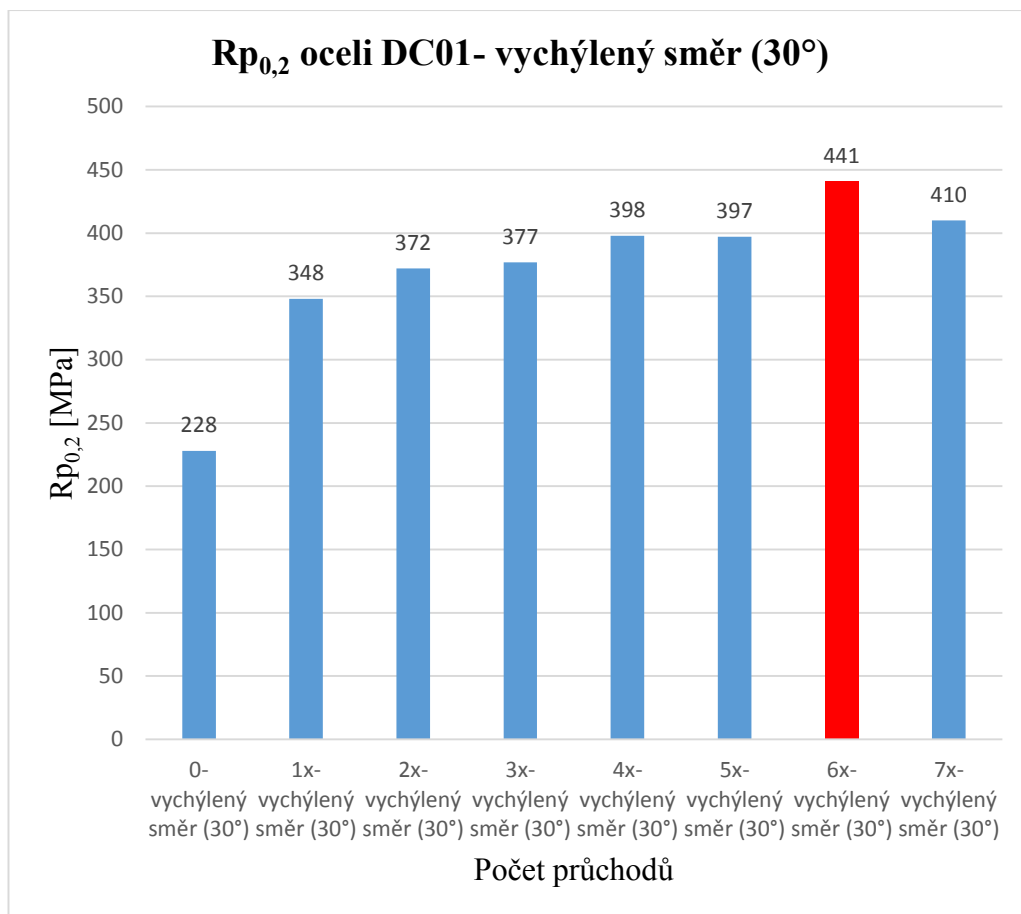
Graf 5 Smluvní mez kluzu v podélném směru

Z Grafu 5 je zřejmé, že se v podélném směru ověřované oceli zvyšuje smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) v závislosti na počtu průchodu oceli tvářecím zařízením. Nejvýznamnější nárůst smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) nastává po 1. průchodu oceli tvářecím zařízením, kdy došlo k nárůstu smluvní meze kluzu ve srovnání s výchozím stavem o 45,4%. Vliv dalších průchodů na nárůst velikosti smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) není významný.



Graf 6 Smluvní mez kluzu v příčném směru

Graf 6 vyjadřuje závislost smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) ověřované oceli v příčném směru na počtu průchodů pásu plechu tvářecím zařízením. Graf 6 prokázal závislost smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) na počtu průchodů. Z Grafu 6 lze jednoznačně určit, že největší nárůst smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) nastává po 1. průchodu oceli tvářecím nástrojem. Smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) se po 1. průchodu zvýšila ve srovnání s výchozím stavem o 84,2%. Vliv dalších průchodů na nárůst velikosti smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) není významný.



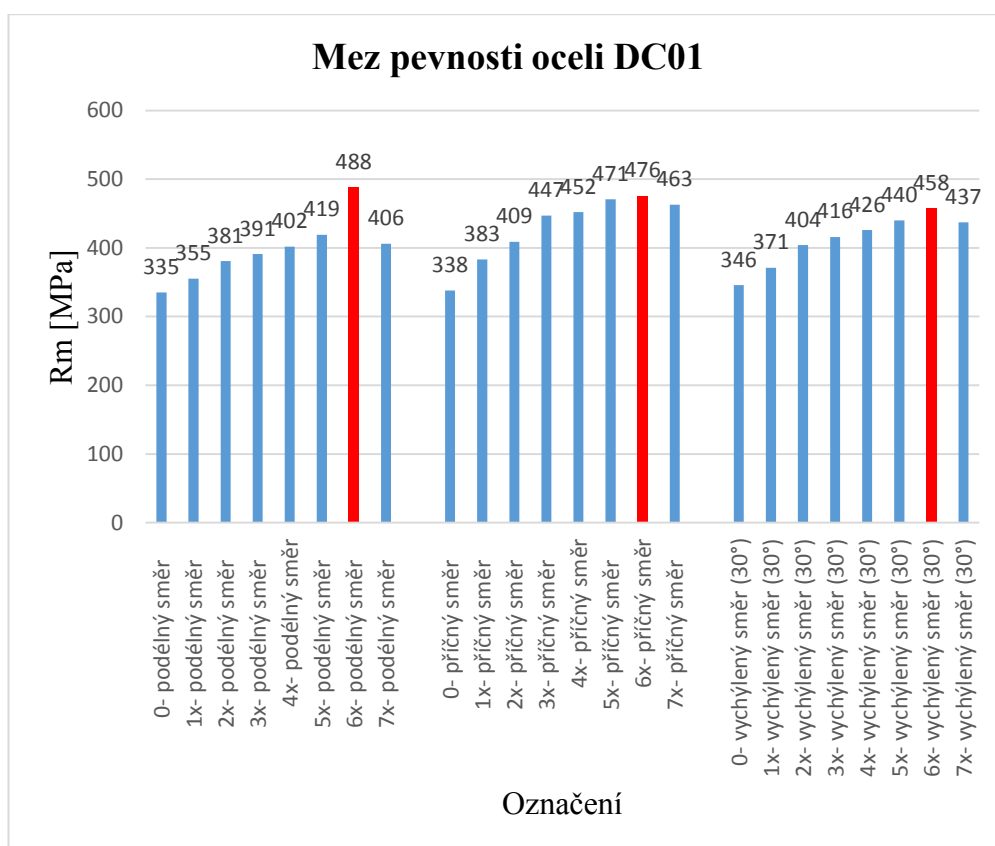
Graf 7 Smluvní mez kluzu ve vychýleném směru (30°)

Graf 7 zobrazuje závislost smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) ověřované oceli ve vychýleném směru (30°) na počtu průchodů pásu plechu tvářecím zařízením. Graf 7 prokázal závislost smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) ve vychýleném směru na počtu průchodů. Z Grafu 7 je zcela patrné, že největší nárůst smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) ve vychýleném směru pásu plechu nastává po 1. průchodu oceli tvářecím nástrojem. Smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) se po 1. průchodu zvýšila ve srovnání s výchozím stavem o 52,6%. Vliv dalších průchodů na nárůst velikosti smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) není významný.

Na základě dosažených výsledků můžeme konstatovat, že výsledky provedených tahových zkoušek na malých vzorcích odpovídají teoretickým předpokladům. Tahové zkoušky prokázaly předpoklad, že smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) oceli DC01 nabývá po 1. průchodu maximální hodnoty v příčném směru, poté následuje vychýlený směr a minimální hodnota smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) je v podélném směru. Z dosažených výsledků rovněž můžeme konstatovat, že anizotropie pásu plechu z oceli DC01 nemá podstatný vliv na mechanické vlastnosti. Nejvyšší hodnoty smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$)

byly dosaženy shodně po 6. průchodu tvářecím zařízením. Daný jev může souviset se statickou rekrystalizací tvářeného materiálu. V dalších pracích je nutno provést podrobnou metalografickou analýzu na TEM a SEM.

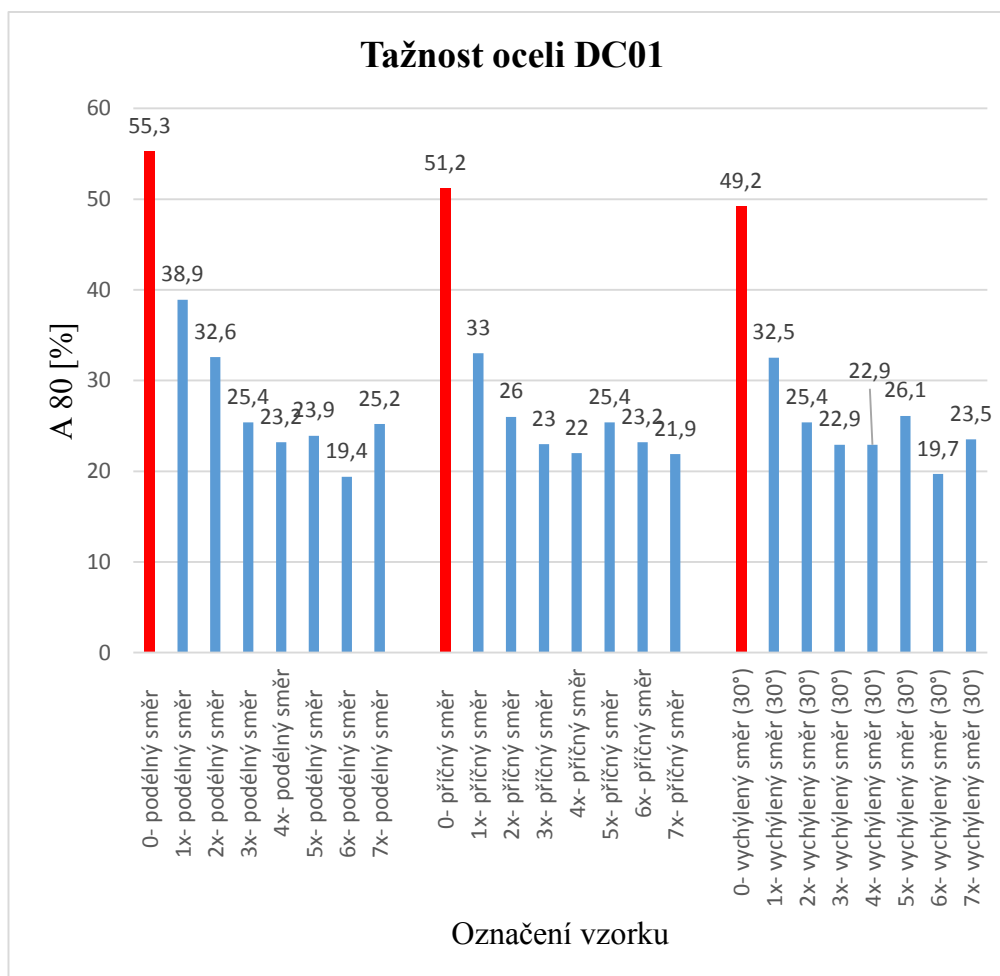
Na základě hodnot mechanických vlastností oceli DC01 získaných provedením tahových zkoušek, jež jsou zapsány v Tab. 5 byl sestrojen Graf 8. Graf 8 zobrazuje závislost meze pevnosti (R_m) ověřované oceli v definovaných směrech na počtu protlačování.



Graf 8 Mez pevnosti v jednotlivých směrech pásu plechu

Z Grafu 8 je zřejmé, že anizotropie pásu plechu nemá podstatný vliv na mez pevnosti (R_m) ověřované oceli. Nejvyšší hodnota meze pevnosti (R_m) byla po 1. průchodu zjištěná v příčném směru plechu, kdy byl zaznamenán nárůst meze pevnosti ve srovnání s výchozím stavem o 13,3%.

Na základě hodnot mechanických vlastností oceli DC01 získaných provedením tahových zkoušek, jež jsou zapsány v Tab. 5 byl sestrojen Graf 9. Graf 9 zobrazuje závislost tažnosti (A_{80}) ověřované oceli v definovaných směrech na počtu protlačování.



Graf 9 Tažnost v jednotlivých směrech pásu plechu

Graf 9 prokázal, že anizotropie pásu plechu nemá významný vliv na tažnost (A_{80}) experimentálně ověřené oceli. Z praktického hlediska je důležitá tažnost zejména po 1. průchodu oceli. Nejvyšší hodnota tažnosti po 1. průchodu byla zaznamenána v podélném směru plechu, kdy byl zjištěn její pokles ve srovnání s výchozím stavem o 16,4%.

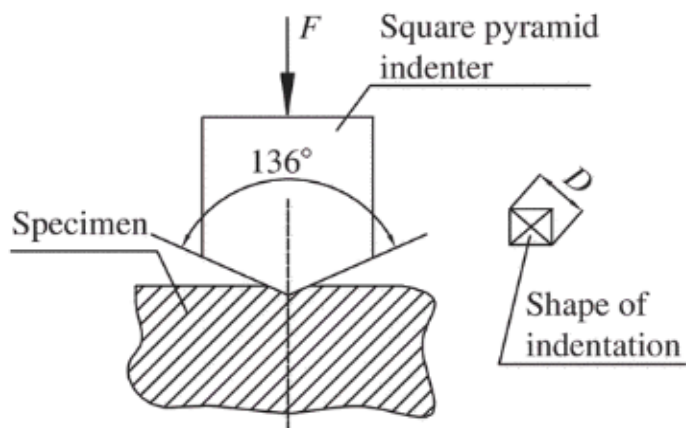
4.3 Tvrdost

Měření tvrdosti bylo provedeno dle Vickerse na zařízení Werkstoffprüfsysteme Leipzig GmbH. Zařízení na měření tvrdosti je zobrazené na Obr. 21.



Obr. 21 Werkstoffprüfsysteme Leipzig GmbH

Při měření tvrdosti dle Vickerse dochází ke vtlačování pravidelného čtyřbokého jehlanu do zkoušeného materiálu. Při měření tvrdosti v rámci této práce bylo provedeno měření tvrdosti dle Vickerse HV10. Při tomto měření byl materiál zatížen silou $F = 98 \text{ N}$ po dobu přibližně 15 s. Schéma měření tvrdosti dle Vickerse je zobrazeno na Obr. 22.



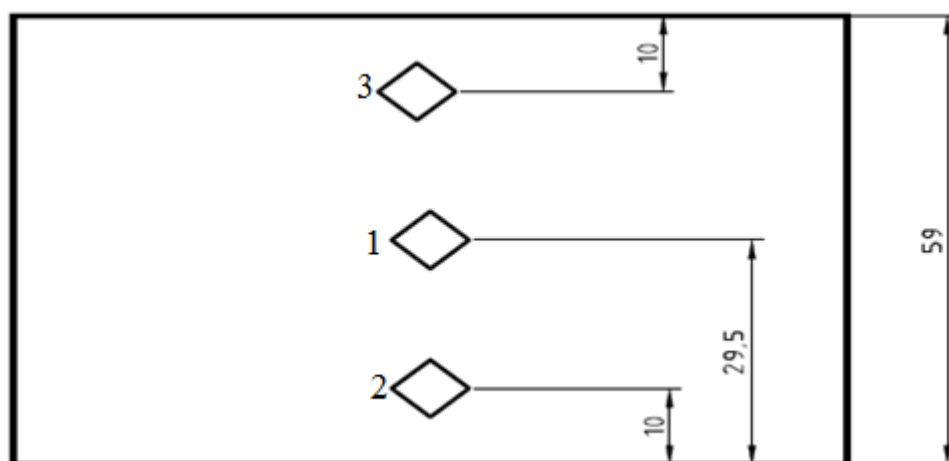
Obr. 22 Schéma metody Vickers [30]

Měření tvrdosti (HV10) bylo provedeno na vrchní straně plechu, tj. strana pásu plechu, která byla v přímém kontaktu s horním nástrojem při tváření metodou DRECE. Na Obr. 23 je zobrazena část plechu, na které bylo provedeno měření.



Obr. 23 Vzorek pro měření tvrdosti plechu DC01

Na každém vzorku pásu plechu byly provedeny tři měření tvrdosti (HV10). Na Obr. 24 je zobrazeno rozložení jednotlivých měření na pásu plechu. Umístění míst pro měření bylo navrženo tak, aby naměřené výsledky reprezentovaly tvrdost (HV10) v celé šířce tvářeného pásu plechu.



Obr. 24 Schéma rozložení měření tvrdosti HV10 na plechu oceli DC01

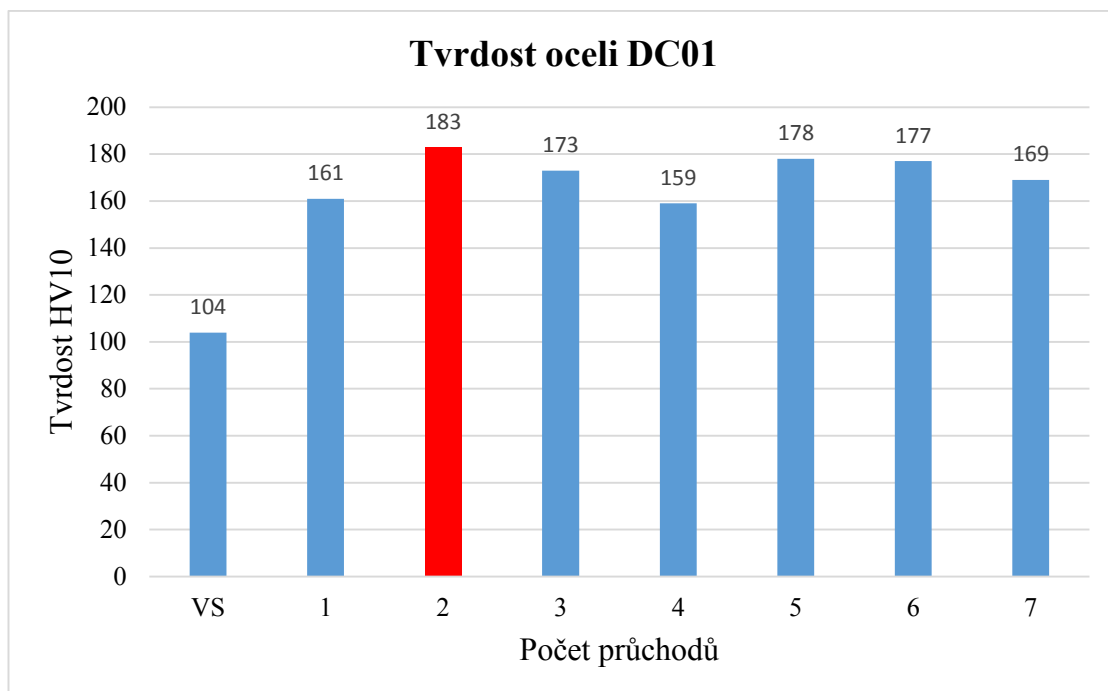
V Tab. 7 jsou uvedeny hodnoty tvrdosti (HV10) oceli DC01 ve výchozím stavu a po jednotlivých průchodech. První sloupec hodnot tvrdosti reprezentuje měření v bodě 1, druhý sloupec v bodě 2 a třetí sloupec reprezentuje měření tvrdosti v bodě 3 (body měření, viz. Obr. 24). V posledním sloupci tabulky je uvedena vypočtená průměrná hodnota tvrdosti (HV10) daného vzorku.

Tab. 7 Tvrdost oceli DC01

Počet průchodů	HV 10	HV 10	HV 10	Průměrná hodnota HV 10
0 (VS)	104	105	105	104
1	159	157	168	161
2	180	183	187	183
3	173	173	175	173
4	165	158	155	159
5	177	179	177	178
6	179	175	176	177
7	171	168	167	169

Z Tab. 7 je zřejmé, že tváření oceli DC01 metodou DRECE má podstatný vliv na tvrdost (HV10) této oceli. Měřením byl prokázán jev, který svědčí o tom, že s rostoucím počtem průchodů oceli tvářecím nástrojem DRECE roste i výsledná tvrdost (HV10) oceli DC01.

Na základě naměřených hodnot tvrdosti (HV10) oceli DC01, které jsou uvedeny v Tab. 7 byl sestaven Graf 9.

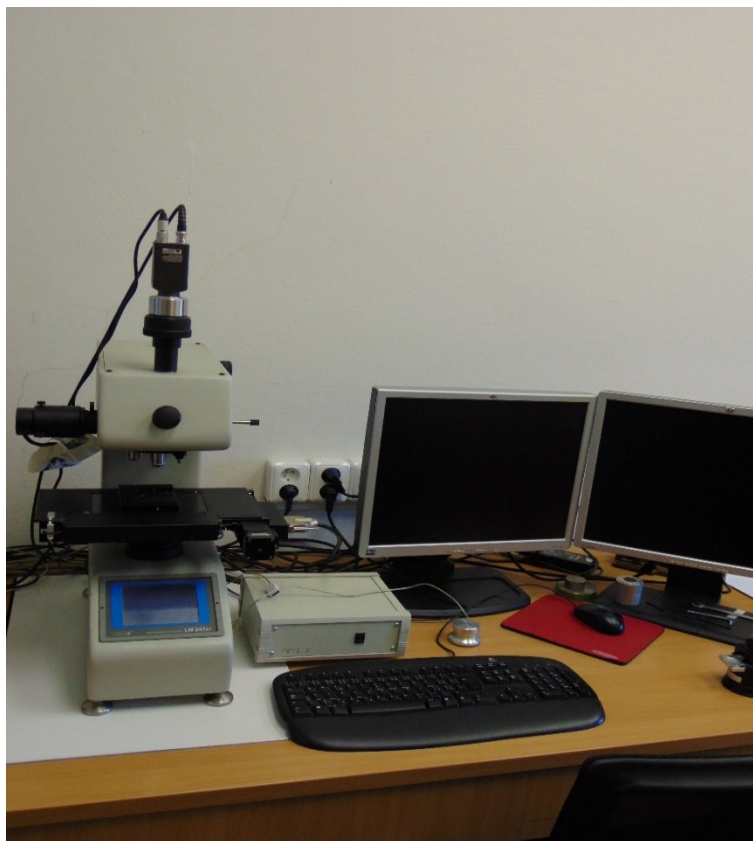


Graf 9 Tvrđost oceli DC01

Z Grafu 9 je patrné, že již po 1. průchodu nastal výrazný nárůst tvrdosti (HV10) oceli DC01. Z grafu lze rovněž jednoznačně určit, že tato ocel dosahuje nejvyšší tvrdosti (HV10) po 2. průchodu. Po 1. průchodu došlo k navýšení tvrdosti (HV10) ve srovnání s výchozím stavem o 54,8%. U následujících průchodů již nebyl nárůst tvrdosti (HV10) tak významný.

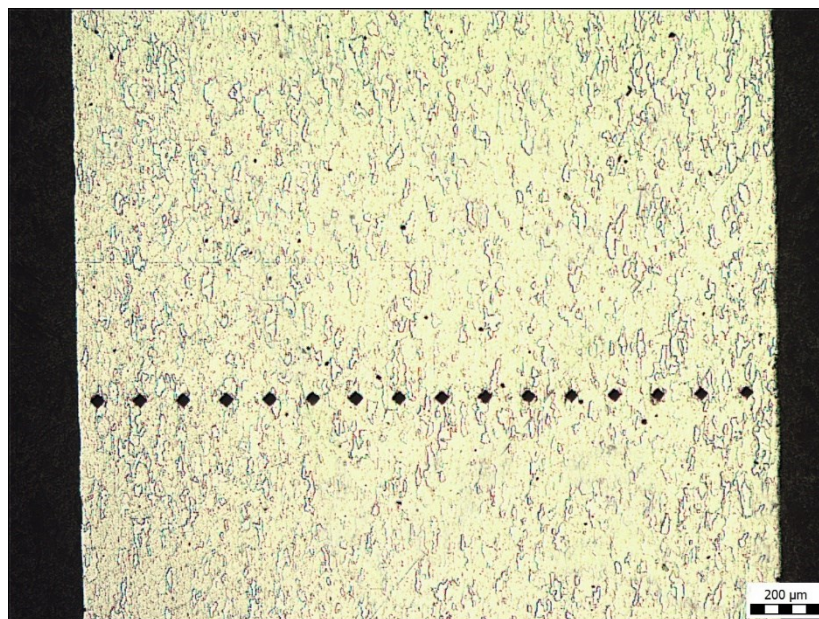
4.4 Mikrotvrost

Měření mikrotvrdosti bylo provedeno na přístroji: Automatický mikro- a makro- tvrdoměr LECO LM 247 AT, soft. podpora AMH 4. Měření mikrotvrdosti bylo provedeno dle Vickerse HV0,1, tedy při zatížení měřeného vzorku 100g. Pracoviště na měření mikrotvrdosti je zobrazeno na Obr. 25.



Obr. 25 Pracoviště na měření mikrotvrdosti

Vzdálenost mezi jednotlivými vpichy měřícího zařízení byla s ohledem na příčný rozměr plechu 2 mm stanovena na 0,12 mm. Rozmístění jednotlivých měření na vzorku je zobrazeno na Obr. 26.



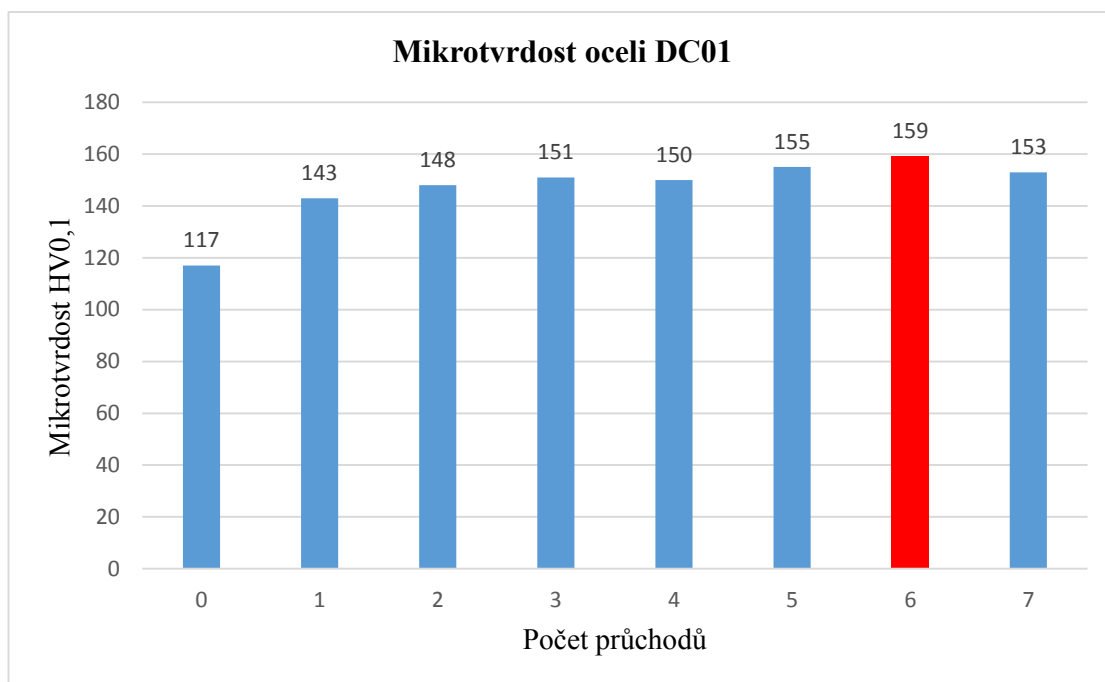
Obr. 26 Měřená místa vpichu mikrotvrdosti

V Tab. 8 jsou uvedeny naměřené hodnoty mikrotvrdosti (HV0,1) oceli DC01 ve výchozím stavu a po jednotlivých průchodech. Měření každého průchodu bylo provedeno 15x.

Tab. 8 Mikrotvrdost oceli DC01

Číslo měření	Počet průchodů							
	0 (VS).	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
1	113	150	156	156	152	160	174	163
2	113	140	168	156	156	163	171	168
2	115	149	147	158	157	162	162	154
4	114	136	143	150	153	138	158	148
5	116	140	145	140	136	153	170	148
6	113	140	138	143	134	148	156	134
7	111	133	143	140	136	146	158	133
8	115	142	137	138	145	144	151	144
9	117	132	135	142	139	152	146	145
10	117	136	140	143	148	153	154	144
11	113	141	147	144	142	147	166	152
12	123	135	144	157	160	174	155	162
13	120	154	156	162	152	158	154	162
14	127	157	156	165	165	160	156	171
15	126	153	172	168	172	168	156	160
Průměrná hodnota	117	143	148	151	150	155	159	153

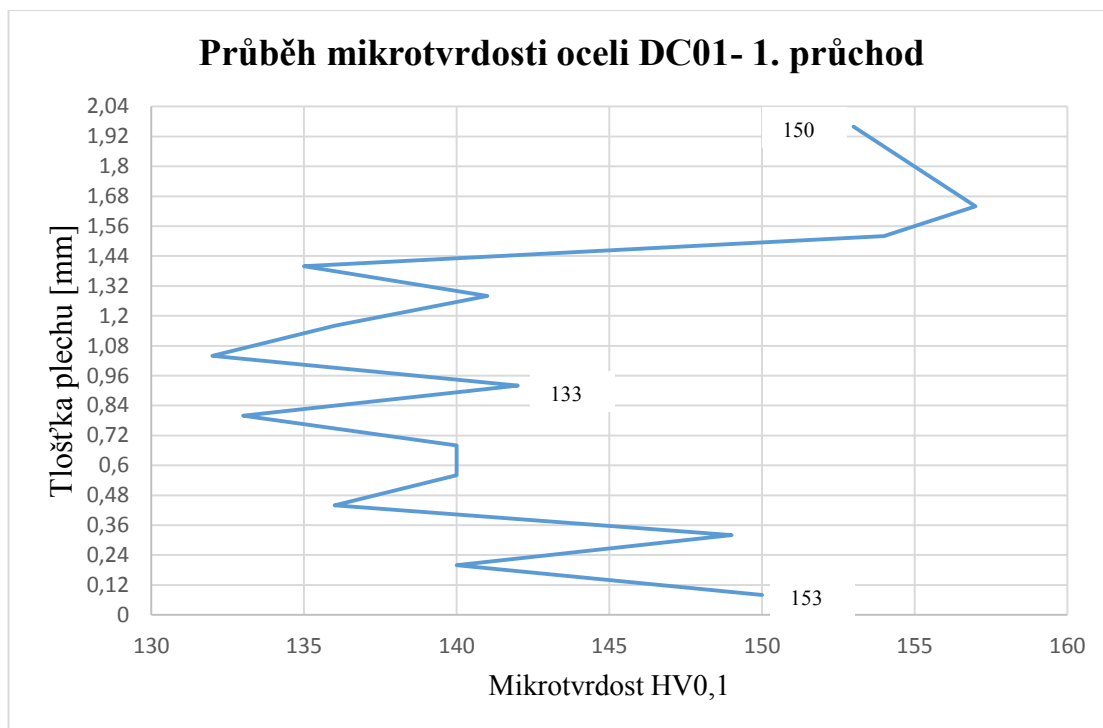
Na základě naměřených hodnot mikrotvrdosti (HV0,1) oceli DC01, viz. Tab. 8, byl sestrojen Graf 10. Graf 10 vyjadřuje závislost mikrotvrdosti (HV0,1) této oceli na počtu průchodů oceli tvářecím zařízením využívajícím metodu DRECE.



Graf 10 Mikrotvrdost oceli DC01

Z Grafu 10 je patrné, že s rostoucím počtem průchodu oceli DC01 tvářecím nástrojem dochází k nárůstu mikrotvrdosti (HV0,1) této oceli. Nejvýznamnější nárůst mikrotvrdosti (HV0,1) nastal po 1. průchodu, kdy bylo dosaženo navýšení mikrotvrdosti o 26 HV0,1, tj. o 22,2%. U následujících průchodů došlo k dalšímu nárůstu mikrotvrdosti (HV0,1), nárůst již však nebyl příliš významný. Nejvyšší hodnota mikrotvrdosti (HV0,1) byla naměřena po 6. průchodu, kdy dosahovala hodnoty 159 HV0,1. Tedy došlo k nárůstu ve srovnání s výchozím stavem, o téměř 36 %.

Jelikož bylo měření mikrotvrdosti (HV0,1) provedeno na celé tloušťce tvářených pásů plechů, lze na základě Tab. 8 rovněž specifikovat vlastní průběh mikrotvrdosti (HV0,1) v celém příčném průřezu tvářeného plechu. Pro specifikaci mikrotvrdosti (HV0,1) v příčném průřezu plechu byl vybrán 1. průchod, jelikož u něj bylo dosaženo nejvýraznější změny. Průběh mikrotvrdosti (HV0,1) v tloušťce pásu plechu je zobrazen na Grafu 11.

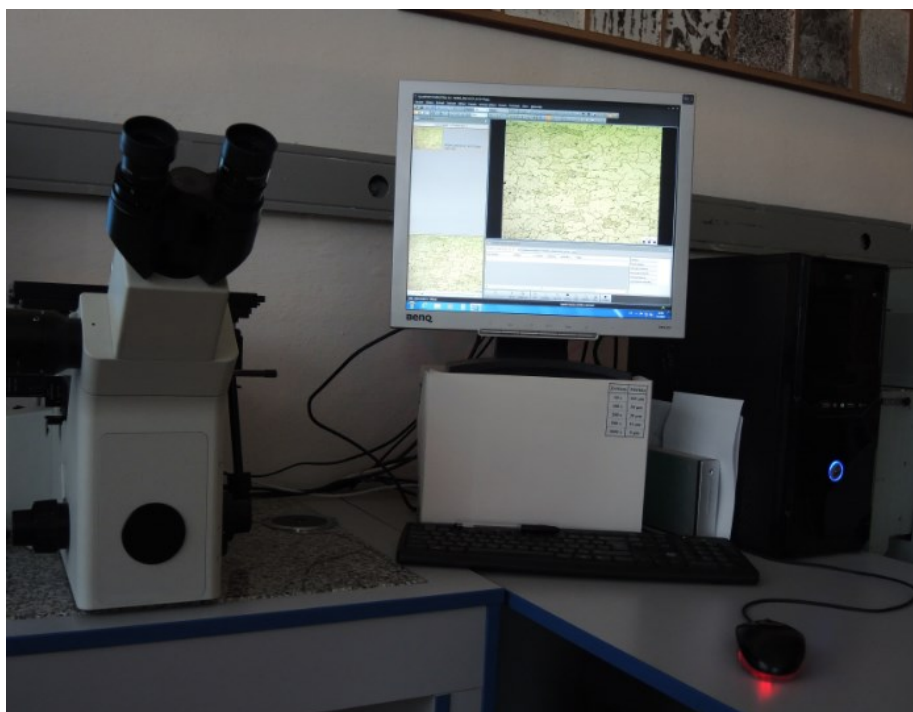


Graf 11 Průběh mikrotvrdosti v tloušťce plechu

Graf 11 zobrazuje rozložení mikrotvrdosti oceli DC01 tvářeného nástrojem DRECE po 1. průchodu v jejím příčném průřezu. Nejvyšší hodnoty mikrotvrdosti je dosaženo na okrajích plechu, kde byla naměřena mikrotvrdost 150 a 153 HV0,1, v polovině tloušťky plechu byla naměřená mikrotvrdost 133 HV0,1. Z tohoto grafu tedy vyplývá, že se mikrotvrdost (HV0,1) ověřované oceli v průběhu vlastní tloušťky pásu plechu mění.

5 ANALÝZA MIKROSTRUKTURY

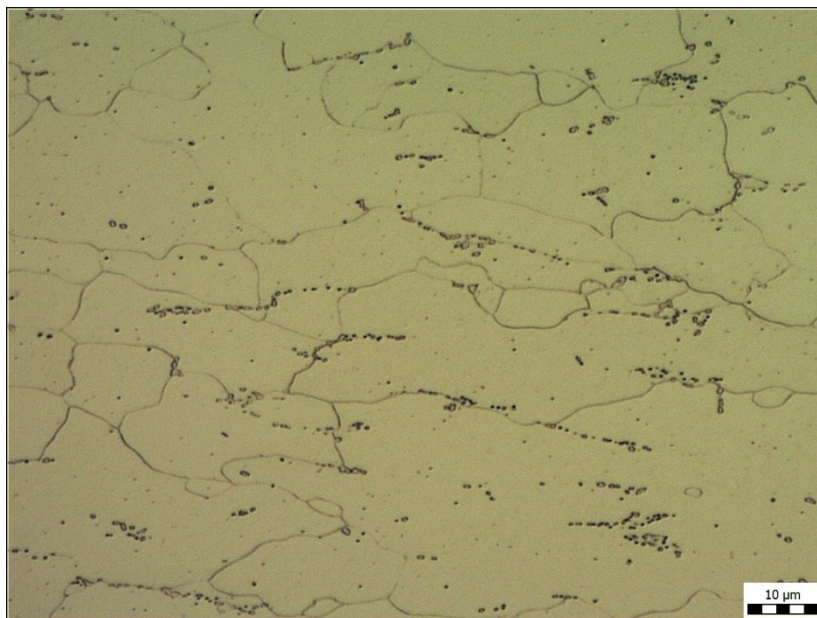
V rámci analýzy mikrostruktury byly vybrány vzorky oceli DC01 ve výchozím stavu, po 1. a po 7. průchodu oceli tvářecím zařízením využívajícím metodu DRECE. 1. průchod byl pro analýzu mikrostruktury zvolen z důvodu, že u něj došlo k nejvýraznější změně mechanických vlastností a tvrdosti. 7. průchod byl zvolen pro analýzu mikrostruktury, jelikož to byl v rámci této diplomové práce nejvyšší provedený průchod na ověřované oceli. Analýza mikrostruktury byla provedena v podélném směru ověřované oceli. Zařízení použité pro analýzu mikrostruktury je zobrazeno na Obr. 27.



Obr. 27 Olympus Gx51

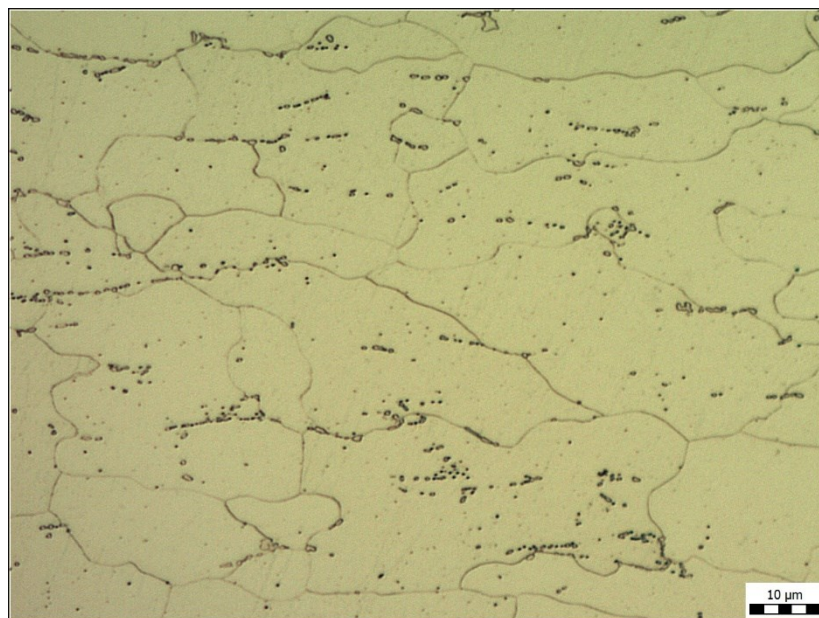
5.1 Analýza mikrostruktury

Na Obr. 28 je zobrazena mikrostruktura oceli DC01 ve výchozím stavu v podélném směru, tj. ve směru tváření oceli metodou DRECE. Snímek zobrazuje mikrostrukturu oceli zvětšenou 500x.



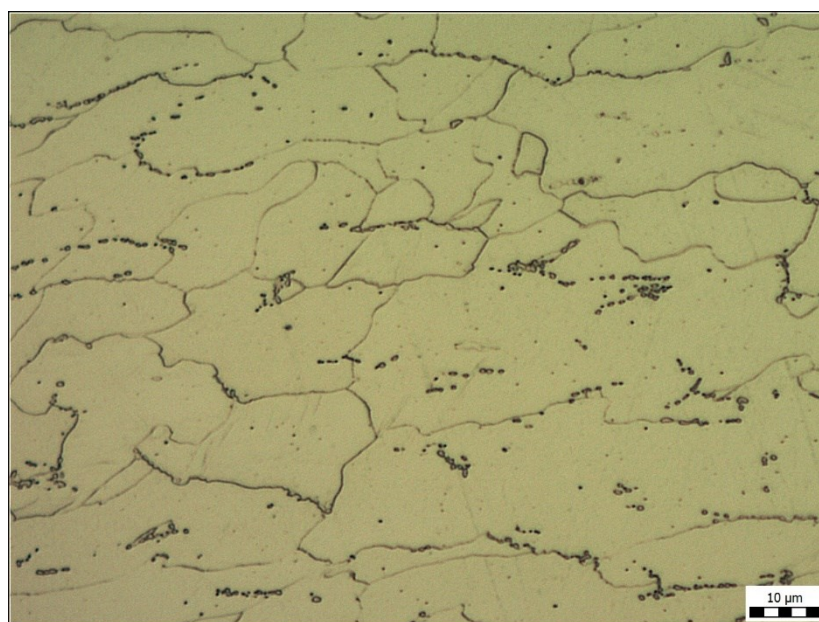
Obr. 28 Výchozí stav, podélný směr

Na Obr. 29 je zobrazena mikrostruktura oceli DC01 po 1. průchodu tvářecím zařízením využívajícím metodu DRECE v podélném směru, tj. ve směru tváření oceli. Snímek zobrazuje mikrostrukturu oceli zvětšenou 500x.



Obr. 29 1. průchod, podélný směr

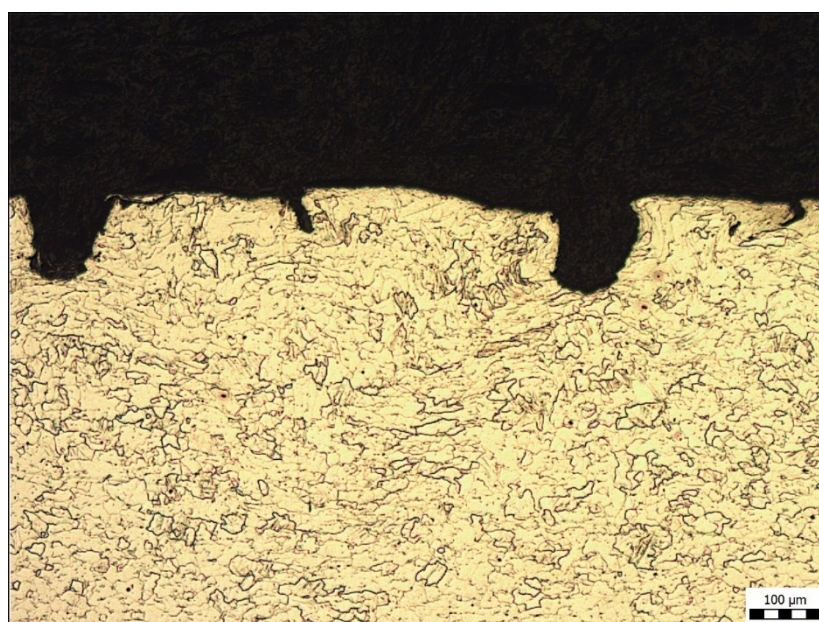
Na Obr. 30 je zobrazena mikrostruktura oceli DC01 po 7. průchodu tvářecím zařízením využívajícím metodu DRECE v podélném směru, tj. ve směru tváření oceli. Snímek zobrazuje mikrostrukturu oceli zvětšenou 500x.



Obr. 30 7. průchod, podélný směr

Metalografické snímky prokázaly, že tváření oceli DC01 metodou DRECE nemá zásadní vliv na její výslednou mikrostrukturu. Metalografický rozbor experimentálně ověřované oceli dále prokázal prodloužení zrn oceli ve směru protlačování. Při tváření oceli DC01 nástrojem DRECE tedy dochází k jejímu zpevňování, nikoliv ke zjemňování zrna oceli. Pro detailnější metalografický rozbor vlivu tváření metodou DRECE na danou ocel doporučuji provést metalografickou analýzu na TEM, SEM.

V rámci analýzy mikrostruktury oceli DC01 po tváření metodou DRECE byla u 7. průchodu zjištěna tvorba defektů v povrchové vrstvě oceli. Defekty v povrchové vrstvě jsou zobrazeny na Obr. 31.



Obr. 31 7. průchod, podélný směr- defekty

Na Obr. 31 je zobrazena mikrostruktura oceli DC01 po 7. průchodu v podélném směru. Na tomto snímku lze vidět, že při 7. průchodu dochází ke značnému poškození oceli. V povrchové vrstvě dochází při protahování již zpevněné oceli tvářecím zařízením ke vzniku výrazných trhlin. Tyto trhliny mohou významným způsobem limitovat pevnostní vlastnosti oceli. Vznik trhlin v povrchové vrstvě může být zapříčiněn vyčerpáním zásoby plasticity v povrchové vrstvě plechu, nevhodnou kombinací přitlačných tlaků na tvářecím zařízení, nesprávným seřazení tvářecí mezery u tvářecího zařízení popřípadě přítomností nečistot v zóně deformace tvářecího zařízení.

5.2 Stanovení velikosti zrn

Velikost zrn byla stanovena srovnávací metodou dle normy ČSN EN ISO 643. Zrno bylo vyvoláno 4 % kyselinou dusičnou (4 % NITAL). Stanovení velikosti zrn bylo provedeno pod povrchem a v polovině tloušťky plechu z důvodů výrazné deformace zrn v povrchové vrstvě oceli. Zařízení, pomocí něhož byla stanovena velikost zrna je zobrazeno na Obr. 32.

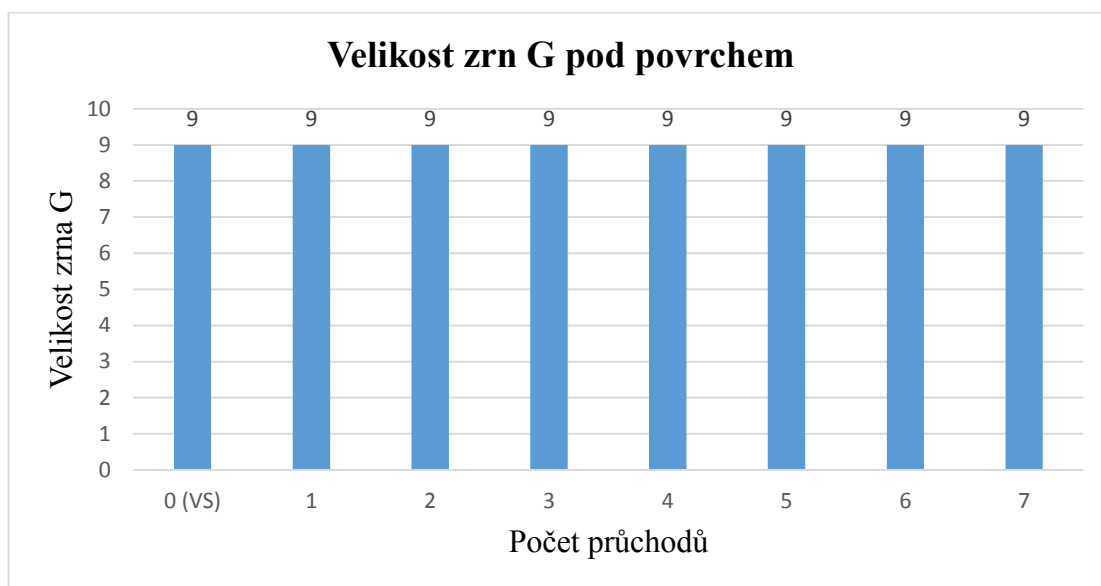


Obr. 32 Neophot 21

Pro stanovení velikosti zrna G bylo provedeno pět měření. V Tab. 9 jsou uvedeny průměrné hodnoty velikosti zrna G po jednotlivých průchodech.

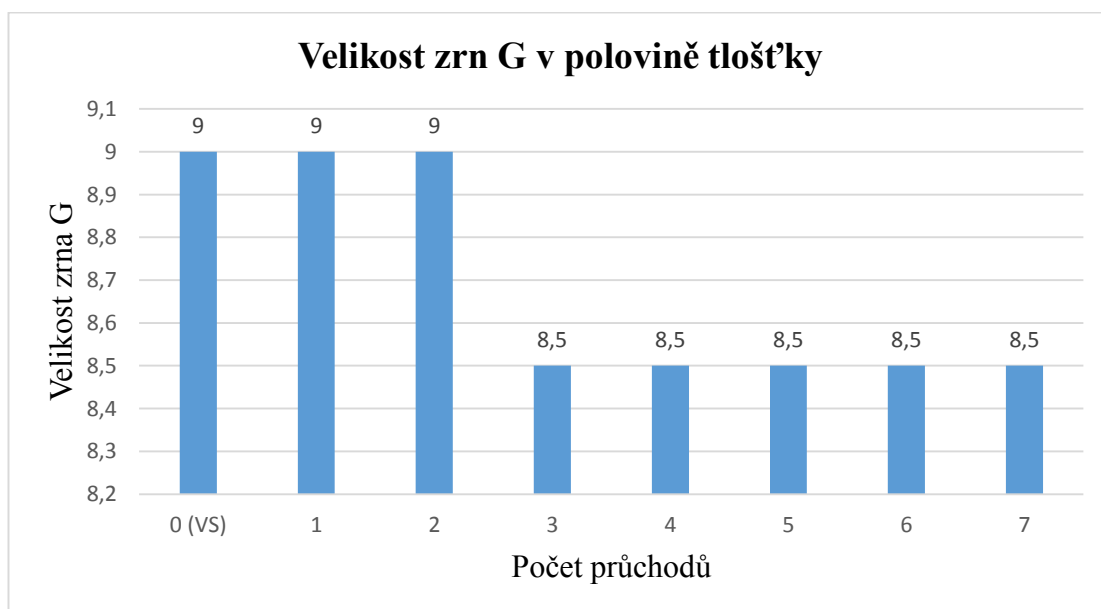
Tab. 9 Velikost zrna G

Počet průchodů	Velikost zrna G pod povrchem	Velikost zrna G v polovině tloušťky
0 (VS)	9	9
1	9	9
2	9	9
3	9	8,5
4	9	8,5
5	9	8,5
6	9	8,5
7	9	8,5



Graf 12 Velikost zrn G pod povrchem

Graf 12 byl sestrojen z hodnot uvedených v Tab. 9. Z Grafu 12 jednoznačně vyplývá, že proces vícenásobné plastické deformace metodou DRECE nemá vliv na velikost zrn pod povrchem ověřované oceli.



Graf 13 Velikost zrn G v polovině tloušťky

Graf 13 byl sestrojen z dat uvedených v Tab. 9. Graf 13 prokázal, že tváření metodou DRECE nemá významný vliv na velikost zrn G v polovině tloušťky ověřované oceli.

6 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU

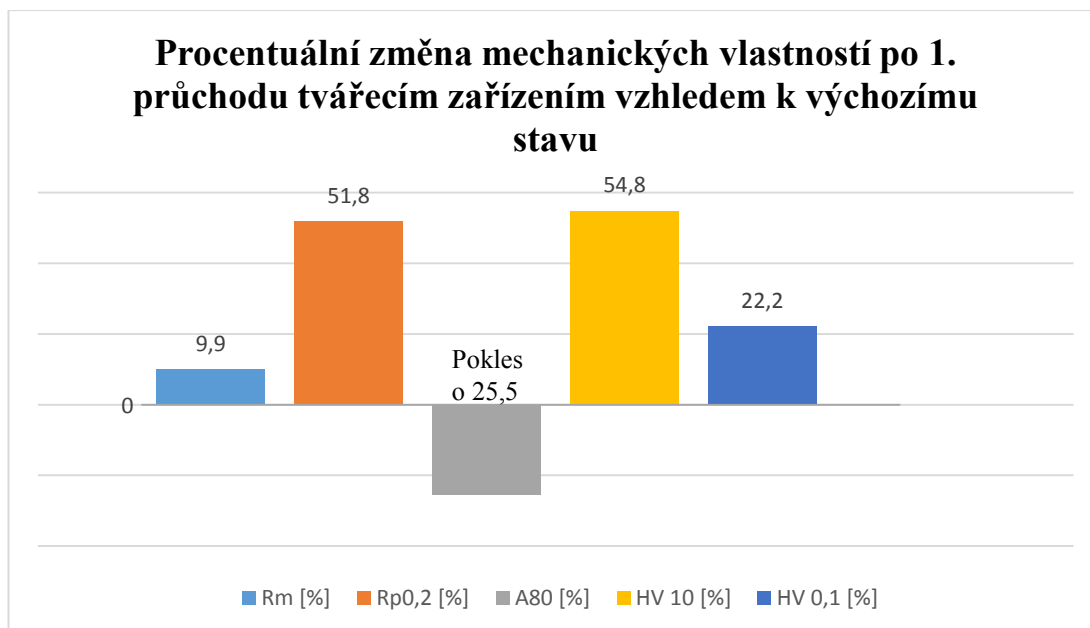
Na základě vyhodnocení výsledků provedeného experimentu metodou DRECE na oceli DC01 lze jednoznačně posoudit vliv počtu průchodů na výsledné mechanické vlastnosti. Nejvýraznější změna mechanických vlastností se projevila již po 1. průchodu oceli tvářecím zařízením. Daný poznatek je velmi dobrý, jelikož umožňuje zařazení této metody do běžné průmyslové praxe.

6.1 Zhodnocení mechanických vlastností

V Tab. 10 jsou uvedeny mechanické vlastnosti oceli DC01 ve výchozím stavu a po 1. průchodu. V této tabulce je rovněž v % vyjádřena změna mechanických vlastností po 1. průchodu vzhledem k výchozímu stavu. Na základě hodnot zapsaných v Tab. 10 je sestrojen Graf 14, který znázorňuje změnu mechanických vlastností (vyjádřenou v procentech) po 1. průchodu vzhledem k výchozímu stavu.

Tab. 10 Mechanické vlastnosti oceli DC01 ve výchozím stavu a po 1. průchodu

	Mechanické vlastnosti				
Počet průchodů	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₈₀ [%]	HV10	HV0,1
0 (VS)	197	323	66	104	117
1	299	355	40,5	161	143
Změna po 1. průchodu vzhledem k VS vyjádřená v %	51,8	9,9	-25,5	54,8	22,2



Graf 14 Změna mechanických vlastností po 1. průchodu vzhledem k VS

Z Grafu 14 lze určit, že veškeré sledované parametry oceli DC01, s výjimkou tažnosti, nabývají prokazatelné zvýšení již po 1. průchodu. Experimentem bylo jednoznačně prokázáno, že tváření nekonvenční metodou DRECE způsobuje kvalitativní nárůst pevnostních vlastností ověřované oceli, při současném zachování dostatečné tažnosti (A_{80}).

Na základě analýzy výsledků experimentu byla jednoznačně prokázána vhodnost metody DRECE pro zvyšování mechanických vlastností oceli DC01. Na základě vyhodnocení mechanických vlastností oceli DC01 tvářené nástrojem DRECE bylo zjištěno, že se u ověřené oceli projevuje výrazný nárůst mechanických vlastností po 1. případně 2. průchodu tvářecím nástrojem. Daný poznatek je velmi důležitý pro praxi, jelikož pro dosažení zlepšených mechanických vlastností tvářené oceli není nutné provádět velký počet průchodů. Experiment prokázal, že nejvyšší smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) a meze pevnosti (R_m) bylo dosaženo po 5. průchodu oceli tvářecím zařízením. Tvrdost (HV10) oceli DC01 byla naměřena maximální po 2. průchodu. Maximální velikost mikrotvrdosti (HV0,1) ověřované oceli byla po 6. průchodu. Dosažené výsledky odpovídají dříve predikovanému vývoji mechanických vlastností ověřované oceli po tváření metodou DRECE.

6.2 Zhodnocení vlivu anizotropie materiálu a počtu průchodů na mechanické vlastnosti

Na základě provedených tahových zkoušek za účelem zjištění vlivu anizotropie materiálu na mechanické vlastnosti je sestavena Tab. 11, ve které jsou uvedeny hodnoty smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) ve všech ověřovaných směrech ve výchozím stavu a po 1. průchodu oceli tvářecím zařízením.

Tab. 11 Porovnání smluvní meze kluzu

Počet průchodů	$R_{p0,2}$ [MPa]		
	Podélný směr	Příčný směr	Vychýlený směr (30°)
0 (VS)	216	203	228
1	314	374	348
Rozdíl $R_{p0,2}$ po 1. průchodu vzhledem k podélnému směru, vyjádřený v %		19,1	10,8

Z hodnot uvedených v Tab. 11 je zřejmé, že anizotropie materiálu nemá příliš významný vliv na smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) oceli DC01. V této tabulce je uvedena hodnota rozdílu smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) v příčném a vychýleném směru vzhledem k podélnému směru po 1. průchodu pásu plechu tvářecím zařízením. Ze zjištěných hodnot je patrné, že analýza vlivu anizotropie materiálu na smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) potvrdila predikovaný závěr, že maximální velikost smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) bude naměřena v příčném směru a minimální velikost je v podélném směru.

Na základě provedených tahových zkoušek za účelem zjištění vlivu anizotropie materiálu na mez pevnosti (R_m) ověřované oceli je sestavena Tab. 12, ve které jsou uvedeny hodnoty meze pevnosti (R_m) ve všech ověřovaných směrech ve výchozím stavu a po 1. průchodu oceli tvářecím zařízením.

Tab. 12 Porovnání meze pevnosti

Počet průchodů	R_m [MPa]		
	Podélný směr	Příčný směr	Vychýlený směr (30°)
0	335	338	346
1	355	383	371
Rozdíl R_m po 1. průchodu vzhledem k podélnému směru, vyjádřený v %		7,9	4,5

Z hodnot uvedených Tab. 12 je zjevné, že anizotropie materiálu nemá zásadní vliv na mez pevnosti (R_m) ověřované oceli. Na základě vyhodnocení této tabulky konstatuji, že byla zjištěna maximální velikost meze pevnosti (R_m) v příčném směru a minimální velikost v podélném směru. Daný poznatek opět potvrzuje předpokládaný závěr, že maximální velikost meze pevnosti (R_m) je v příčném směru pásu plechu a minimální velikost v podélném směru.

Na základě provedených tahových zkoušek za účelem zjištění vlivu anizotropie materiálu na tažnost (A_{80}) ověřované oceli DC01 je sestavena Tab. 13, ve které jsou uvedeny hodnoty tažnosti (A_{80}) ve všech ověřovaných směrech ve výchozím stavu a po 1. průchodu oceli tvářecím zařízením.

Tab. 13 Porovnání tažnosti

Počet průchodů	A₈₀ [%]		
	Podélný směr	Příčný směr	Vychýlený směr (30°)
0	55,3	51,2	49,2
1	38,9	33	32,5
Rozdíl A₈₀ po 1. průchodu vzhledem k podélnému směru, vyjádřený v %		5,9	6,4

Z hodnot uvedených Tab. 13 je patrné, že anizotropie oceli DC01 nemá významný vliv na tažnost (A_{80}) této oceli. V tabulce je uvedena hodnota rozdílu tažnosti (A_{80}) v příčném a vychýleném směru vzhledem k podélnému směru po 1. průchodu pásu plechu tvářecím zařízením. Na základě analýzy hodnot uvedených v Tab. 13 konstatuji, že výsledky prokázala predikovaný vývoj tažnosti (A_{80}) v ověřovaných směrech. Data potvrdila, že maximální velikosti tažnosti (A_{80}) je dosaženo v podélném směru. V příčném a vychýleném směru jsou hodnoty tažnosti (A_{80}) srovnatelné.

Na základě dosažených výsledků vlivu anizotropie materiálu na mechanické vlastnosti konstatuji, že anizotropie plechu oceli DC01 nemá podstatný vliv na její výsledné mechanické vlastnosti. Nejzřetelnější vliv byl prokázán u smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$), kde v příčném směru dochází k jejímu navýšení o 19,1 % vzhledem k podélnému směru. Mez pevnosti (R_m) i tažnost (A_{80}) se v příčném a vychýleném směru významně nelišila vzhledem k podélnému směru. Při tváření metodou DRECE se jedná o proces protlačování, proto se hodnoty smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$), meze pevnosti (R_m) a tažnosti (A_{80}) v jednotlivých směrech liší. Daný poznatek je v souladu s teoretickými předpoklady.

6.3 Zhodnocení mikrostruktury

Metalografický rozbor ověřované oceli byl proveden v jejím výchozím stavu, po 1. průchodu, kdy došlo k nejvýraznější změně mechanických vlastností a po 7. (nejvyšším) průchodu. Z dosažených výsledků metalografického rozboru konstatuji, že počet průchodů oceli DC01 tvářecí metodou DRECE nemá vliv na zjemnění zrna této oceli, ale má zásadní vliv na zpevnění materiálu. Dané tvrzení je doloženo zjištěným dislokačním zpevněním struktury vyhodnocované na optickém mikroskopu. Z hlediska dalšího vývoje tvářecí metody DRECE navrhuji zařazení vhodného tepelného zpracování tvářené oceli po prvním, druhém, případně mezi jednotlivými průchody tvářecím zařízením. Předpokládám, že zařazení vhodného tepelného zpracování do procesu tváření touto metodou zajistí zjemnění zrna oceli a umožní dosáhnout dobré tvářitelnosti oceli, aniž dojde k významnému poklesu mechanických vlastností.

6.4 Zhodnocení vlivu metody DRECE na velikost zrn

V Tab. 14 je uvedena zjištěná velikost zrna G pod povrchem a v polovině tloušťky pásu plechu ověřované oceli ve výchozím stavu a po 1. průchodu.

Tab. 14 Velikost zrna

Počet průchodů	Velikost zrna G pod povrchem	Velikost zrna G v polovině tloušťky
0 (VS)	9	9
1	9	9

Z Tab. 14 je zcela zřejmé, že tváření oceli DC01 tvářecím nástrojem DRECE nemá vliv na velikost zrna jak pod povrchem, tak ani v polovině tloušťky pásu plechu. Na základě analýzy vlivu metody DRECE na zjemňování zrna ověřované oceli tedy konstatuji, že daná metoda nemá prokazatelný vliv na výslednou velikost zrna po 1. ani 2. průchodu pásu plechu tvářecím nástrojem.

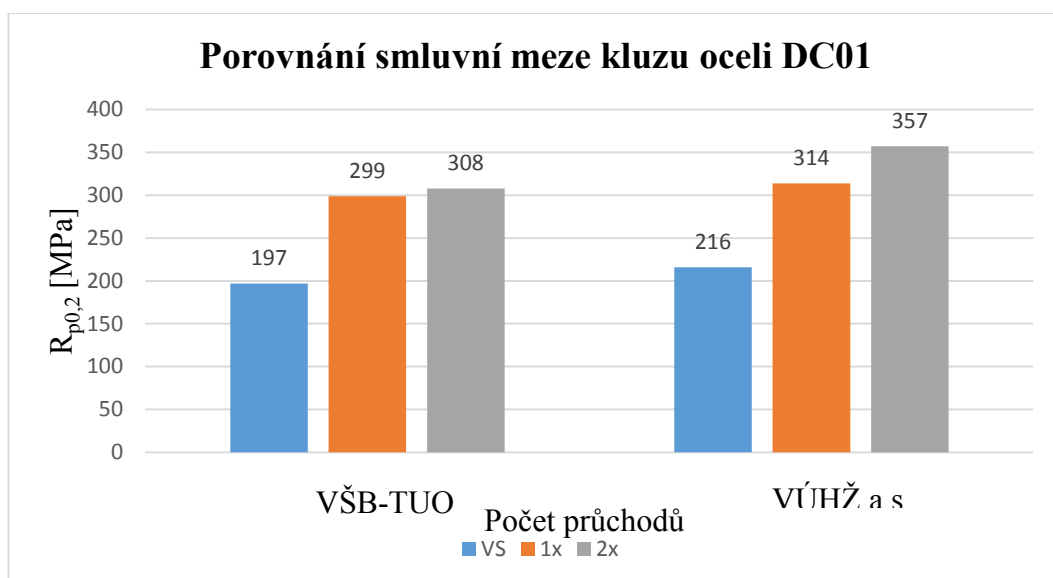
6.5 Porovnání výsledků tahových zkoušek

V rámci této diplomové práce byly provedeny tahové zkoušky ve dvou laboratořích. První část tahových zkoušek byla provedena v Laboratoři mechanických vlastností VÚHŽ a. s. Dobrá. Zde byly provedeny tahové zkoušky s cílem stanovit mechanické vlastnosti v podélném směru plechu ověřované oceli. Druhá část tahových zkoušek byla provedena v laboratoři CPIT na VŠB- TUO s cílem stanovit vliv anizotropie materiálu na mechanické vlastnosti ověřované oceli. Druhá část tahových zkoušek byla provedena v podélném, příčném a vychýleném směru (úhel vychýlení byl 30° vůči podélnému směru). Cílem této kapitoly bylo porovnat, zda výsledky tahových zkoušek provedených na malých vzorcích v laboratoři VŠB- TUO odpovídají výsledkům tahových zkoušek provedených dle normy ČSN EN ISO 6892-1 (420310) ve VÚHŽ a. s. Dobrá. V Tab. 15 jsou uvedeny hodnoty mechanických vlastností v podélném směru, které byly získány provedením tahových zkoušek v obou laboratořích.

Tab. 15 Mechanické vlastnosti- VÚHŽ a.s., VŠB- TUO

Označení	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
VŠB- TUO				
0 (VS)	3330	216	335	55,3
1	3480	314	355	38,9
2	3740	357	381	32,6
VÚHŽ a.s.				
0 (VS)	36 500	197	323	66
1	38 000	299	355	40,5
2	40 500	308	379	29,5

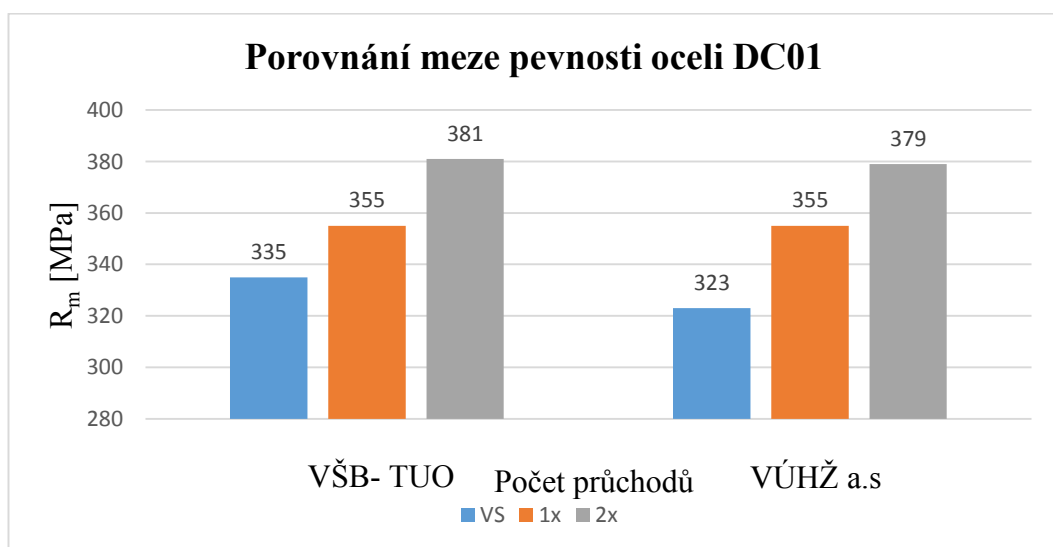
Z hodnot mechanických vlastností, které jsou uvedeny v Tab. 15, byl sestrojen Graf 15. Graf 15 zobrazuje porovnání hodnot velikosti smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) získané v laboratoři VÚHŽ a.s. a v laboratoři VŠB- TUO.



Graf 15 Porovnání smluvní meze kluzu oceli DC01

Z Grafu 15 je zřejmé, že tahové zkoušky provedené v laboratoři VŠB- TUO prokázaly 51,8 % nárůst smluvní meze kluzu ($R_{p0.2}$) po 1. průchodu a 56,3 % nárůst po 2. průchodu ve srovnání s výchozím stavem. Tahové zkoušky provedené ve VÚHŽ a. s. vykázaly 45,4 % nárůst smluvní meze kluzu ($R_{p0.2}$) po 1. průchodu a 65,3 % nárůst po 2. průchodu ve srovnání s výchozím stavem.

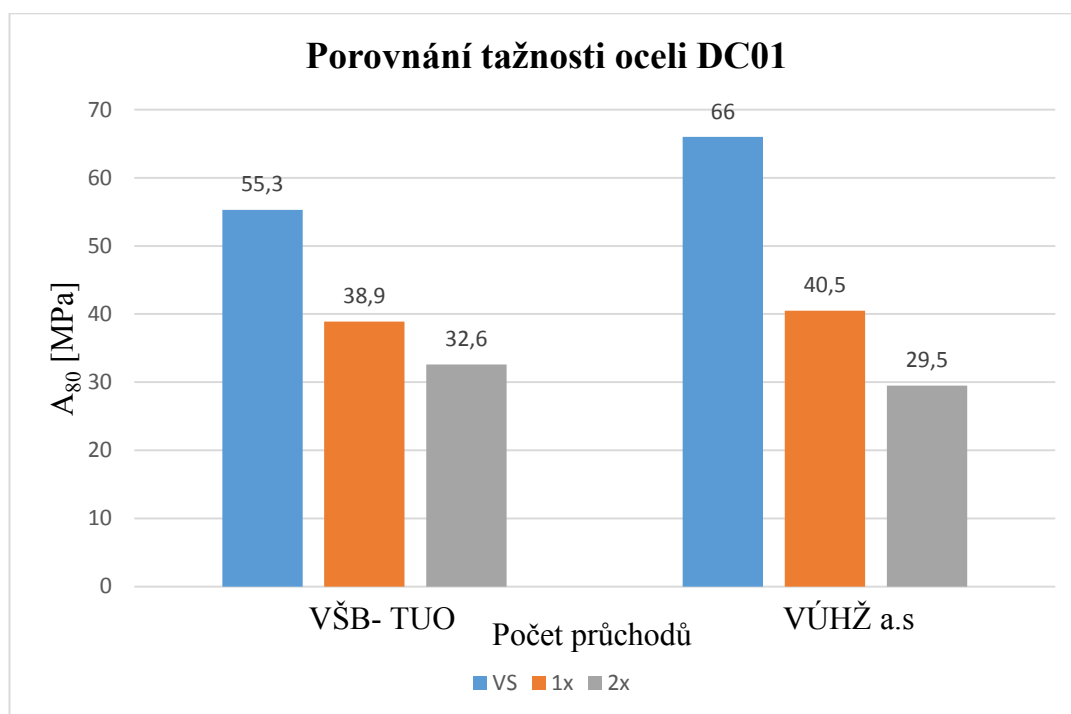
Z hodnot mechanických vlastností, které jsou uvedeny v Tab. 15, byl sestrojen Graf 16. Graf 16 zobrazuje porovnání hodnot velikosti meze pevnosti (R_m) získané v laboratoři VÚHŽ a.s. a v laboratoři VŠB- TUO.



Graf 16 Porovnání meze pevnosti oceli DC01

Z Grafu 16 je zřejmé, že tahové zkoušky provedené v laboratoři VŠB- TUO prokázaly 6 % nárůst meze pevnosti (R_m) po 1. průchodu a 13,7 % nárůst po 2. průchodu ve srovnání s výchozím stavem. Tahové zkoušky provedené ve VÚHŽ a. s. vykázaly 10 % nárůst meze pevnosti (R_m) po 1. průchodu a 17,3 % nárůst po 2. průchodu ve srovnání s výchozím stavem.

Z hodnot mechanických vlastností, které jsou uvedeny v Tab. 15, byl sestrojen Graf 17. Graf 17 zobrazuje porovnání hodnot velikosti tažnosti (A_{80}) získané v laboratoři VÚHŽ a.s. a v laboratoři VŠB- TUO.



Graf 17 Porovnání tažnosti oceli DC01

Z Grafu 17 je zřejmé, že tahové zkoušky provedené v laboratoři VŠB- TUO prokázaly 16,4 % pokles tažnosti (A_{80}) po 1. průchodu a 22,7 % pokles po 2. průchodu ve srovnání s výchozím stavem. Tahové zkoušky provedené ve VÚHŽ a. s. vykázaly 25,5 % pokles tažnosti (A_{80}) po 1. průchodu a 36,5 % pokles po 2. průchodu ve srovnání s výchozím stavem.

Na základě porovnání výsledků tahových zkoušek v laboratoři VŠB- TUO a v Laboratoři mechanických vlastností VÚHŽ a. s. Dobrá konstataji, že výsledky tahových zkoušek provedených v laboratoři VŠB- TUO odpovídají výsledkům tahových zkoušek provedených ve VÚHŽ a. s.. Maximální odlišnost výsledků byla zjištěna

u tažnosti (A_{80}) ve výchozím stavu oceli (může se jednat o plech z jiné tavby, který byl pro účely experimentů nakupován v různém časovém období). Hodnoty mechanických vlastností získané na malých vzorcích v laboratoři VŠB- TUO se mírně liší od hodnot získaných ve VÚHŽ a. s., rozdíl u malých vzorků mohl vzniknout omezeným počtem vzorků. Na základě uvedené analýzy konstatuji, že můžeme pro vyhodnocování mechanických vlastností (zejména vlivu anizotropie materiálu na jejich velikost) použít k vyhodnocování tahové zkoušky provedené na malých vzorcích. Výsledky je možno korigovat velikosti chyby řádově do 10 %.

ZÁVĚR

Úvodní část diplomové práce byla zaměřena na rešerši nejčastěji používaných tvářecích metod výroby ultra-jemnozrnných materiálů procesem vícenásobné plastické deformace (SPD). V této části jsou popsány jednotlivé metody a následně jsou doplněny funkčními schématy. Zároveň jsou k jednotlivým metodám uvedeny výsledky provedených výzkumných prací.

V diplomové práci byly provedeny experimenty na oceli DC01 metodou DRECE s úhlem nástroje 108° . Na základě dosažených výsledků tahových zkoušek byla jednoznačně prokázána vhodnost metody DRECE pro zvyšování mechanických vlastností oceli DC01. Již po 1. průchodu tvářecím nástrojem došlo k velmi výraznému navýšení jak smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) tak meze pevnosti (R_m) při zachování dostatečné tažnosti (A_{80}). Z dosažených výsledků mechanických vlastností po jednotlivých průchodech tvářecím zařízením můžeme konstatovat, že ocel DC01 má dostatečnou zásobu plasticity pro následné tvářecí operace. V diplomové práci bylo následně provedeno měření tvrdosti i mikrotvrdosti po jednotlivých průchodech tvářecím zařízením.

V další části této práce byl ověřen vliv anizotropie materiálu a počtu průchodů na mechanické vlastnosti ověřované oceli. Zde nebyl zjištěn významný vliv anizotropie materiálu na jeho výsledné vlastnosti. Byl potvrzen predikovaný poznatek, že smluvní mez kluzu ($R_{p0,2}$) a mez pevnosti (R_m) nabývá maximální velikosti v příčném směru tvářeného pásu plechu a minimální velikosti nabývá v podélném směru pásu plechu. Rovněž byl potvrzen teoretický předpoklad, že tažnost (A_{80}) nabývá maximální velikosti v podélném směru tvářeného pásu plechu a minimální velikosti nabývá v příčném směru pásu plechu.

V závěrečné části diplomové práce byl analyzován vliv počtu průchodů tvářecím zařízením na výslednou mikrostrukturu oceli DC01 a střední velikost zrna. Z výsledků metalografické analýzy je patrné, že metoda DRECE nemá podstatný vliv na zjemnění struktury, dochází k tzv. dislokačnímu zpevnění. S rostoucím počtem průchodů bylo dosaženo jen nepatrné změny velikosti zrna. Podstatným jevem, který je velmi

významný pro průmyslovou praxi, je dosažení významného nárůstu smluvní meze kluzu ($R_{p0,2}$) již po 1. průchodu tvářecím zařízením.

Na základě vyhodnocení experimentálně dosažených výsledků bylo prokázáno, že metoda DRECE je metoda vhodná pro zvyšování mechanických vlastností oceli DC01. Experimentem bylo prokázáno, že pro dosažení výrazného nárůstu mechanických vlastností je dostačující provést 1 až 2 průchody tvářecím nástrojem. Dalším důležitým poznatkem je poznatek, že z hlediska významnosti nebyl prokázán vliv anizotropie plechu. Výše uvedené poznatky jsou velmi důležité pro budoucí využití metody DRECE v průmyslové praxi - jelikož se snižujícím se počtem průchodů pásu plechu tvářecím nástrojem, potřebných pro dosažení požadovaných pevnostních i tvářecích vlastností, dochází ke snížení výrobních nákladů a tím roste i celková efektivita výroby.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu prof. Ing. Stanislavu Ruszovi, CSc., za vstřícnost a poskytnuté rady při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňkovi Štorkánovi, Ing. Xenii Ševčíkové Ph.D. a Ing. Jiřímu Švecovi za pomoc při provedení a vyhodnocení experimentální části diplomové práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITRATURY

- [1] Valiev R. Z., K. Islamgaliev, and I. V. Alexandrov. *Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation*. Progress Mater. Sci., 2000. 45 103- 89
- [2] Valiev R. Z., T. G. and Langdon. *Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement*. Progress Mater. Sci., 2006. 51 881- 981
- [3] Beyerlein I. J. and L. S. Toth. *Texture evolution in equal-channel angular extrusion*. Progress Mater. Sci., 2009. 54 427- 510
- [4] Langdon T. G. *Twenty-ve years of ultra_ne-grained materials: Achieving exceptional properties through grain re_nement*. Acta Mater., 2013. 61 7035- 59
- [5] Gu C. F., L. S. Toth, R. Lapovok, C. H. J. Davies. *Texture evolution and grain refinement of ultrafine-grained copper during micro-extrusion*. Philos. Mag., 2011. 91 273- 290
- [6] N. A. Smirnova, V. I. Levit, V. E. Pilyugin, R. I. Kuznetsov, L. A. Davydova and R. A. Sazonova, Met. Phys. Metall., 61 (1986) 1170
- [7] A. Lasalmoni and J. L. Stryel, J. Mater. Sci., 21 (1986) 1837
- [8] R. Z. Valiev, O. A. Kaibyshev, P. N. Kuznetsov, R. Sh. Mussalirnov and N. K. Tsenev, Dokl. Akad. Nauk SSSR, 301 (1988) 864
- [9] O. Kaibyshev, R. Kaibyshev and G. Salishchev, *Proc. Int. Conf. on Recrystallization-92*. San-Sebastian, Spain, Mater. Sci. Forum, 113-115 (1993) 423
- [10] R. Z. Valiev, A. K. Korznikov and R. R. Mulyukov, Met. Phys. Metall., 4 (1992) 70
- [11] G. A. Salishchev, R. M. Imayev, V. M. Imayev and N. K. Gabduilin, Mater. Sci. Forum, 113-115 (1993) 613

- [12] E. N. Teitel, M. A. Uimin, A. E. Ermakov, A. V. Shangurov, V. A. Barinov, G. M. Makarova, R. I. Kuznetsov, V. P. Pilyugin and V. N. Gundyrev, *Met. Phys. Metall.*, 7(1990) 95
- [13] R.Z. Valiev, N. A. Krasilnikov and N. K. Tzenev, *Mater. Sci. Eng.*, A137(1991) 35
- [14] BERECKZI, P., V. SZOMBATHELYI a G. KRALLICS. *Production of ultrafine grained aluminum by cyclic severe plastic deformation at ambient temperature*. Budapest, Hungary, 2014. Budapest University of Technology and Economics.
- [15] ODNOBOKOVA, M., A. KIPELOVA, A. BELYAKOV a R. KAIBYSHEV. *Microstructure evolution in a 316L stainless steel subjected to multidirectional forging and unidirectional bar rolling*. Russia, 2014. Belgorod State University.
- [16] Krishnaiah A., Chakkingal U. and Venugopal U. 2005 *Applicability of the groove pressing technique for grain refinement in commercial purity copper*. *J Mat Sci Eng: A* 410 pp 337-40
- [17] Yanushkevich Z., Mogucheva A., Tikhonova M., Belyakov A. and Kaibyshev R.. *Structural strengthening of an austenitic stainless steel subjected to warm-to-hot working*. *Mater. Character.*, 2011. 62 432-437
- [18] Lo K. H., C. H. Shek and J. K. L. Lai. *Recent developments in stainless steel*. *Mater. Sci. Eng.*, 2009. 65 39–104
- [19] Martienssen W. and H. Warlimont. *Handbook of Condensed Matter and Materials Data* (Berlin: Springer), 2005.
- [20] ZIMINA, M., J. BOHLEN, D. LETZIG, G. KURZ, M. CIESLAR a J. ZRNÍK. *The study of microstructure and mechanical properties of twin-roll cast AZ31 magnesium alloy after constrained groove pressing*. Czech Republic, 2014. Charles University in Prague.
- [21] . J.C. Lee, H.K. Seok, J.H. Han, and Y.H. Chung: *Mater. Res. Bull* 2001, vol. 36, p. 997.

- [22] TAN, Evren, Alp Aykut KIBAR and C. Hakan GÜR. *Mechanical and microstructural characterization of 6061 aluminum alloy strips severely deformed by Dissimilar Channel Angular Pressing. Materials Characterization* [online]. 2011, **62**(4), 391-397 [cit. 2018-01-15]. DOI: 10.1016/j.matchar.2011.01.016. ISSN 10445803. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1044580311000301>
- [23] RUSZ, S., L. CIZEK, M. SALAJKA, J. KEDRON a S. TYLSAR. *Processing of low Carbon steel by dual rolls equal channel extrusion*. Ostrava - Poruba, Czech Republic, 2014. VSB - Technical University of Ostrava.
- [24] M.G. Nicholas, D.R. Milner Br. Weld. J., 8 (1961), p. 375
- [25] SAITO, Y., H. UTSUNOMIYA, N. TSUJI and T. SAKAI. Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. *Acta Materialia* [online]. 1999, **47**(2), 579-583 [cit. 2018-01-16]. DOI: 10.1016/S1359-6454(98)00365-6. ISSN 13596454. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645498003656>
- [26] KAHANI KHABUSHAN, JALAL A SOHEILA BAZZAZ BONABI. *Investigating of the Microstructure and Mechanical Properties of Al-Based Composite Reinforced with Nano-Trioxide Tungsten via Accumulative Roll Bonding Process. Open Journal of Metal* [online]. 2017, **07**(01), 9-23 [cit. 2018-01-16]. DOI: 10.4236/ojmetal.2017.71002. ISSN 2164-2761. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/doi.aspx?DOI=10.4236/ojmetal.2017.71002>
- [27] Zhu, Y. T., H. Jiang, J. Huang and T. C. Lowe. *Metall. Mater. Trans. A* (submitted for publication)
- [28] HUANG, J.Y., Y.T. ZHU, H. JIANG a T.C. LOWE. *Microstructures and dislocation configurations in nanostructured Cu processed by repetitive corrugation and straightening*. *Acta Materialia* [online]. 2001, **49**(9), 1497-1505 [cit. 2018-01-16]. DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00069-6. ISSN 13596454. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359645401000696>

[29] POGGIALI, FLÁVIA SPITALE JACQUES, ROBERTO BRAGA FIGUEIREDO, MARIA TERESA PAULINO AGUILAR A PAULO ROBERTO CETLIN. *Grain refinement of commercial purity Magnesium processed by Ecap (Equal Channel Angular Pressing)*. Materials Research [online]. 2012, **15**(2), 312-316 [cit. 2018-04-19]. DOI: 10.1590/S1516-14392012005000022. ISSN 1980-5373.

[30] K. OH-ISHI, Z. HORITA, M. FURUKAWA, M. NEMOTO and T. G. LANGDON, *ibid.* 29A (1998) 2011.

[31] Y. IWAHASHI, Z. HORITA, M. NEMOTO and T. G. LANGDON, *Acta Mater.* 46 (1998) 3317.

[32] ARAB, S.M. and A. AKBARZADEH. *The effect of Equal Channel Angular Pressing process on the microstructure of AZ31 Mg alloy strip shaped specimens*. Journal of Magnesium and Alloys [online]. 2013, **1**(2), 145-149 [cit. 2018-04-19]. DOI: 10.1016/j.jma.2013.07.001. ISSN 22139567. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213956713000236>

[33] *ALFUN Metal service center: Ocel* [online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/ocel>